Spektrum DER WISSENSCHAFT

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT 11/07

NOVEMBER 2007

URERDE
Wie einfach war der Weg zum Leben?

ZUKUNFT
Vision einer Erde ohne Menschen

WALDBRÄNDE
Bessere Vorhersage und Bekämpfung

Vorstoß bis an die Grenzen des Sonnensystems

Die ehrgeizigen Weltraumpläne von Esa und Nasa

7,40 € (D/A) · 8,– € (L) · 14,– sFr

D6179E

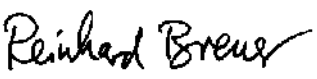
Reinhard Breuer
Chefredakteur

Wer zu viel löscht, legt Brände

Waldbrände haben in diesem Sommer mehr als sonst in Europa gewütet und vor allem Griechenland, Italien und den Balkan heimgesucht. Die Bilder von verzweifelten Menschen, die Haus, Hof und Herden verlieren, erschüttern dann viele Menschen. Feuerwehrleute kämpfen, Löschflugzeuge werden eingeflogen, Aufnahmen verkohlter Häuser gehen um die Welt – und zwei Wochen später ist die Katastrophe wieder vergessen. Auch wenn häufig Brandstifter hinter den Feuern stecken, die abgebrannte Areale unter Ausnutzung gesetzlicher Bestimmungen in lukratives Bauland umwandeln wollen, bleiben genügend natürliche und indirekt verschuldete Ursachen. So leistet etwa in den USA eine falsch verstandene Forstwirtschaft vielen Bränden erst Vorschub. Dort trägt – auch wenn es paradox klingt – die offizielle Maßgabe, alle Feuer möglichst sofort zu löschen, zu späteren Großbränden bei. Wie Landschaftsökologen und Klimatologen heute mit Computersimulationen Brandgefahren vorhersagen und vorbeugende Maßnahmen empfehlen können, lesen Sie ab S. 88.

Ziemlich überrascht waren wir in der Redaktion, als zu unserem Artikel über das »Urlauberdilemma« – bei dem es darum geht, durch scheinbar irrationales Handeln einen größeren Gewinn einzustreichen – eine Fülle von Leserbriefen bei uns eintraf (SdW 8/2007, S. 82; für die Debatte siehe www.spektrum.de/artikel/893108): darunter viele interessant und gespickt mit detaillierten, alternativen Lösungsvorschlägen. Viele Leser entwickelten, neben einer Kritik an der Spieltheorie, auch andere Vorstellungen darüber, was »rationales Handeln« bedeutet. Unser Mathematikredakteur Christoph Pöppe fand die Beiträge so anregend, dass er jetzt – zusammen mit Auszügen aus den wichtigsten Briefen – in einem Essay auf die wesentlichen Einwände und Ideen eingeht (S. 98).

Herzlich Ihr



ZWEI SONDERHEFFTE

will ich Ihnen ankündigen:

»Raumschiff Erde – Eine kurze Geschichte der Menschheit«: Gefahren sind das Los des irdischen Lebens, das auf einem kleinen Planeten durchs Weltall treibt. Von den prekären Ursprüngen auf der erkaltenden Urerde bis in die Zukunft der Menschheit zeichnet diese Ausgabe ein Panaroma unserer kosmischen Existenz.

»Kosmische Ursprünge – Wie Astronomen die Geschichte des Universums enträtseln«: Bizarre Prozesse kennzeichnen das Geschehen im All. Es begann mit dem Urknall. Erste Sterne brachten Licht ins Dunkel des jungen Weltalls. Schließlich führt die kosmische Beschleunigung in die Zukunft eines kalten und unbelebten Weltraums.

Mitten im Markt Messe Stuttgart

VISION 2007

20. Internationale Fachmesse für industrielle Bildverarbeitung und Identifikationstechnologien

Neue Messe Stuttgart
6.- 8. November 2007

Schlüsselerlebnis.

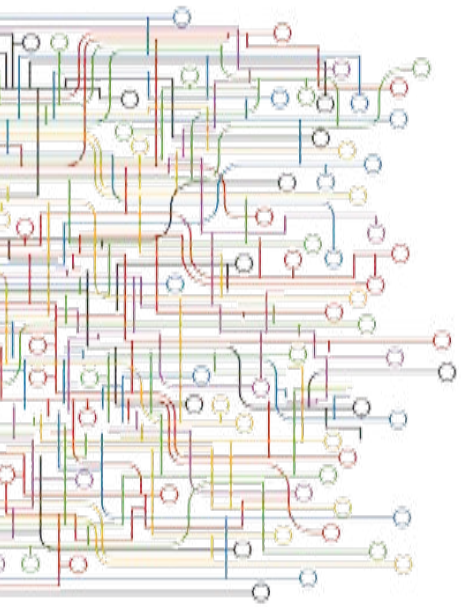
Prozessoptimierung muss nicht teuer sein. Davon könnten Sie sich auf der Weltleitmesse für industrielle Bildverarbeitung überzeugen. Dank der neuesten Entwicklungen werden die Systeme und Komponenten immer leistungsfähiger. Das Gute dabei: Sie werden damit auch günstiger. So rechnen sich die niedrigen Investitionen bereits nach wenigen Monaten. Entdecken Sie Ihre individuelle IBV-Lösung jetzt auf der VISION 2007, auf Europas modernstem Messegelände.

www.vision-messe.de

Hin und zurück an 1 Tag!
In 5 Minuten zu Fuß von Deutschlands zweitgrößter Destination für Billigflieger auf die Neue Messe Stuttgart

INHALT

NOVEMBER 2007



40

MEDIZIN & BIOLOGIE **Atlas des Krebsgenoms**

74

ERDE & UMWELT **Erde ohne Menschen**

54

MEDIZIN & BIOLOGIE **Haifische mit Elektrosinn**

AKTUELL

12 Spektrogramm
Wie Männer duften · Zweisprachige Vogelchefs · Ursprung des Dinokillers u. a.

15 Bild des Monats
Klimawandel öffnet Nordwestpassage

16 Der Pille auf der Spur
Per Magnetismus verfolgen Forscher den Weg von Tabletten durch den Körper

18 Abkürzung durch die Raumzeit
Neutrino-Experiment liefert Hinweise auf zusätzliche Raumdimensionen

19 Die Maus, die in die Kälte ging
Ein Ionenkanal lässt uns Kälte spüren

20 Kommentar: Stammzellen
Wie human sind Mensch-Tier-Hybride?

22 Superabsorber für Öl
Was in Windeln Babypos trocken hält, könnte nun auch Öllachen aufsaugen

25 Springers Einwürfe
Die Zukunft bringt's nicht

ASTRONOMIE & PHYSIK

TITELTHEMA

26 Fünf Ziele für die Raumfahrt
Die ehrgeizigen Pläne von Esa und Nasa reichen von der Erdbeobachtung über die Asteroidenabwehr bis hin zum Überschreiten der Grenzen des Sonnensystems

36 Physikalische Unterhaltungen
Jedes Atom in einem Kristall hat seinen »Einzugsbereich« aus allen Punkten, die ihm näher liegen als jedem anderen Atom. Diese Wigner-Seitz-Zellen sind – teils seltsam geformte – raumfüllende Polyeder

MEDIZIN & BIOLOGIE

40 Katalog der Krebsgene
In einem Mammutprojekt sollen alle Mutationen bei sämtlichen Krebsarten aufgespürt und katalogisiert werden. Lässt sich so die Geißel der Menschheit endlich besiegen?

54 Der sechste Sinn der Haie
Erst spät gelang es, den Sinn merkwürdiger Strukturen in der Kopfhaut von Haien und Rochen zu deuten: Knorpelfische orten damit die elektrischen Felder ihrer Beute

64 ▶ Einfacher Ursprung des Lebens
Statt mit der Vererbung könnte das Leben mit dem Stoffwechsel begonnen haben. Dafür würden wesentlich einfachere Moleküle genügen

Titelillustration: Ron Miller (Mars von Phobos aus) und Stephen C. Hartmann, Lockheed Martin Corp. (Orion Mannschaftskapsel mit Sonnensegeln)

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

WEITERE RUBRIKEN

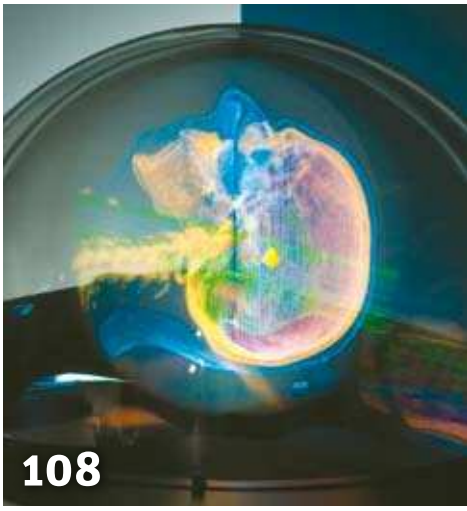
5 Editorial
10 Leserbriefe
11 Impressum
107 Rückblick
116 Rezensionen
122 Vorschau

TITELTHEMA

Bis an die Grenzen des Sonnensystems 26

88

ERDE & UMWELT
Waldbrände



108

TECHNIK & COMPUTER
Blick in die Tiefe

ERDE & UMWELT

74 ▶ Erde ohne Menschen
Was würde passieren, wenn plötzlich alle Menschen verschwunden wären? Der Autor Alan Weisman weiß die Antwort

88 ▶ Simulation von Waldbränden
Mit raffinierten Programmen prognostizieren Forscher, wo es künftig brennt

MENSCH & GEIST

98 Essay: Was ist wirklich rational?
Es ist die Unberechenbarkeit! Eine Nachlese zu der lebhaften Diskussion über das Urlauberdilemma

104 Junge Wissenschaft
Zwanzig Jahre Wettbewerb »Jugend Innovativ« in Österreich

TECHNIK & COMPUTER

108 Blick in die Tiefe
Neue Geräte liefern echt dreidimensionale bildliche Darstellungen

114 Wissenschaft im Alltag
Ein Draht, ein Stück geprägtes Blei, eine hauchdünne Folie oder ein Chip – Siegel machen Kriminellen das Leben schwer

IN DIESEM HEFT: SciTechs
Magazin für Technologietransfer

Thema der Woche

e·on
Neue Energie

ONLINE

BRIDGEMAN GIRAUDON

FÜR ABONNENTEN »Kleopatra, die letzte Pharaonin« www.spektrum-plus.de

ERIC ISSELEE

TIPPS Ausgeschaltete Mäusegene – Spektrum-Autor erhielt Nobelpreis
www.spektrum.de/artikel/907271

FREIGESCHALTET »Urzeugung aus Kometenstaub?«
www.spektrum.de/artikel/849269

spektrumdirekt

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Wie das Leben zu dem wurde, was es heute ist

Evolution findet täglich statt: Bakterien werden resistent gegen Medikamente, Fische oder Vögel spalten sich in neue Arten auf. Auch der Blick in die Vergangenheit ist lohnend, denn Biologen beschreiben immer mehr Zweige im Stammbaum des Lebens. Alle Nachrichten unter
www.spektrumdirekt.de/evolution

Nachrichten aus dem All

Neue Raumfahrtmissionen, Ergebnisse der Mars- oder Saturnforschung und Experimente, die Bakterien und Geckos in die Schwerelosigkeit schicken: **spektrumdirekt** berichtet aktuell über die Erforschung des Weltraums
www.spektrumdirekt.de/raumfahrt

TIPPS

Brainlogs – Täglich Neues vom Gehirn

Ob freier Wille oder Neuro-Enhancement, Online-Dating oder Alzheimer-WG: Für das Blogportal »Brainlogs«, das unsere Verlagskollegen aus der Redaktion von **Gehirn&Geist** aufgebaut haben, verfassen Wissenschaftler und Journalisten aktuelle Kommentare zu Themen rund um Psyche und Gehirn. Diskutieren Sie mit auf
www.brainlogs.de

Ausgeschaltete Mäusegene – Spektrum-Autor erhielt Nobelpreis

Mario R. Capecchi erhielt am 9. Oktober den Medizin-Nobelpreis 2007. In Spektrum der Wissenschaft schrieb er bereits 1994 über seine nun preisgekrönte Methode, wie man gezielt Gene bei Mäusen ausschalten kann
www.spektrum.de/artikel/907271

INTERAKTIV

Ihre Meinung über unser neues Layout

Ist Spektrum der Wissenschaft durch neue Gestaltungselemente übersichtlicher und informativer geworden? Wir baten Sie um Ihre Meinung. Die Umfrageergebnisse stellen wir vor auf
www.spektrum.de/artikel/907470

Honigsüßer Hörgenuss: »Der Bien«

Geben Bienen »Muttermilch«? Wie funktioniert ihr Kilometerzähler? Und was ist das Comb Wide Web? Auf der Doppel-CD »Der Bien – Superorganismus Honigbiene« gibt Jürgen Tautz die Antworten. Nach unseren 5x5-Kriterien können Sie das Hörbuch auch selbst bewerten! Die Rezension finden Sie auf
www.spektrumdirekt.de/artikel/904513

FÜR ABONNENTEN

»Kleopatra, die letzte Pharaonin«

Als »Hure vom Nil« und große Verführerin geistert die Ptolemäerin durch die Bücher. Alles nur Propaganda, sagen Forscher heute. Neuerdings wagen sie, am Bollwerk der Vorurteile zu rütteln. Schemenhaft wird allmählich das Bild einer intelligenten, nüchtern kalkulierenden Herrscherin erkennbar, die das Erbe ihrer Väter zu behaupten suchte

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

FREIGESCHALTET

»Auf den Spuren Ole Römers«

Ein »Spaziergang« durch Kopenhagen erinnert an den berühmten Sternwartendirektor. Vor 300 Jahren gab er der astronomischen Beobachtungstechnik wegweisende Impulse

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **STERNE UND WELTRAUM** UNTER

www.suw-online.de/artikel/906439

»Urzeugung aus Kometenstaub?«

Konkurrierende Ansätze versuchen, die Entstehung des Lebens zu erklären (S. 64, »Ein einfacher Ursprung des Lebens«). Aber auch Staubteilchen von Kometen könnten als Starter-Kit für das Leben gewirkt haben, wie der Beitrag »Urzeugung aus Kometenstaub?« aus unserem Dossier »Leben im All« berichtet

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE UNTER

www.spektrum.de/artikel/849269

Alle Publikationen unseres Verlags sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.de
service@spektrum.com
Telefon 06221 9126-743

Spektrum.de

Heftarchiv
www.spektrum.de/archiv

Spektrum Notizen
www.spektrum.de/notizen

Spektrogramm
www.spektrum.de/spektrogramm

Spektrum Tagebuch
www.spektrum.de/tagebuch

Spektrum zum Hören
www.spektrum.de/hoeren

Spektrum in die Schulen
www.spektrum.de/wis

Der Mathematische Monatskalender
www.spektrum.de/monatskalender

Leserbriefe
www.spektrum.de/leserbriefe

Newsletter
www.spektrum.de/newsletter

DIESE UND WEITERE RUBRIKEN FINDEN SIE AUF DER NAVIGATIONSLEISTE UNSERER HOMEPAGE

Für Sie holen wir den Strom aus dem Meer.

Für Ihre sichere und umweltgerechte Energieversorgung der Zukunft suchen wir nach immer neuen Wegen. Und das sogar unter Wasser! Denn die Strömungen des Meeres haben ein gewaltiges Energiepotenzial. Deshalb planen wir den Bau eines weltweit einzigartigen Gezeitenkraftwerks. Mit der Strömung, die zwischen Ebbe und Flut entsteht, werden wir dort zuverlässige Energie erzeugen. Wieder ein Schritt, der uns unabhängiger von endlichen Energiequellen macht. So bieten wir Ihnen auch in Zukunft höchste Versorgungssicherheit.

Mehr über E.ON und das neue Gezeitenkraftwerk erfahren Sie unter www.eon.com

e·on
Neue Energie

Kein Kernbrennstoffproblem dank Schneller Brutreaktoren

Sauber, aber nicht rein
Nachgehakt, Juli 2007

Unerwähnt bleiben in dem Artikel die erheblichen Unterschiede im Energieaufwand zwischen den Anreicherungsverfahren. Das moderne Gaszentrifugenverfahren verbraucht etwa 65-mal weniger Energie als das ältere Gasdiffusionsverfahren. Für den CO_2-Beitrag ist zudem wichtig, ob die Anreicherungsanlagen mit nuklear erzeugtem Strom oder mit Strom aus Kohlekraftwerken betrieben werden. Solche und andere Unterschiede führen dazu, dass der CO_2-Beitrag der Kernkraft durchaus zwischen 10 und 80 Gramm CO_2/kWh schwanken kann.

Der Artikel lässt zudem außer Acht, dass man bei einer Verknappung von Uran stärker auf die Rezyklierung von Resturan und Plutonium aus den abgebrannten Brennelementen setzen wird. Das erfordert die Wiederaufarbeitung des abgebrannten Brennstoffs, sie wird zum Beispiel in französischen und britischen Wiederaufarbeitungsanlagen seit Längerem praktiziert. Die dazu benötigte Energie kann von KKWs geliefert werden. Beim Einsatz von Schnellen Brutreaktoren wird es schließlich über Jahrhunderte kein Kernbrennstoffproblem geben. Diese Reaktoren erzeugen mehr Kernbrennstoff, als sie selbst verbrauchen.

Die Behauptung des Herrn Bossel, dass schon in wenigen Jahrzehnten der Energieaufwand für die Gewinnung des Kernbrennstoffs die Energieerzeugung der KKWs übersteige, ist somit nicht glaubhaft.

Dr. Hartmut Wand, Nussbaumen, Schweiz

Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief direkt in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit Ihrer vollständigen Adresse an:
Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Die großen Forscher aus Old-Europe nicht verleugnen

Der Charme einfacher Weltbilder
Springers Einwürfe, August 2007

Ich bin völlig einverstanden mit dem Hinweis, dass antiwissenschaftliche Weltanschauungen auf dem »Charme einfacher Weltbilder« beruhen, die in jeder menschlichen Ontogenese angelegt sind. Die Priorität für die wissenschaftliche Begründung dieser Einsicht liegt jedoch ganz klar bei Jean Piaget.

Nichts gegen Havard University, aber wir sollten doch die großen Forschergestalten aus »old Europe« nicht verleugnen.

Dr. Armin Tippe, Schwabhausen

Mehr als nur Mathematik

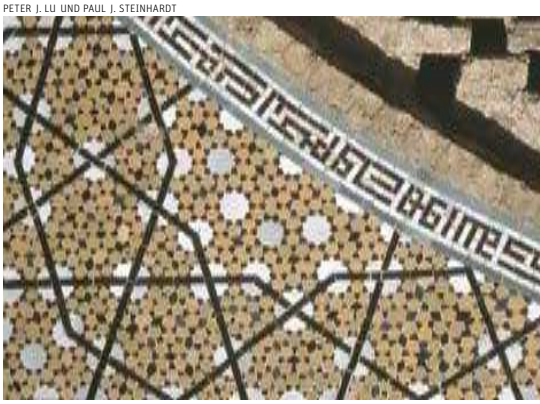
Moderne Mathematik in islamischen Ornamenten, Forschung aktuell, September 2007

Irreführend ist die Überschrift »Moderne Mathematik …« insofern, als daraus geschlussfolgert werden könnte, dass nur eine solche die Konstruktionsprinzipien der beschriebenen Knotenmuster zu erhellen in der Lage sei. Die damalige Herstellung ihrer Strukturen beruhte aber auf dem bereits vorhandenen hohen Stand mathematisch-geometrischer Kenntnisse und deren Anwendung. Denn die Herstellung von standardisierten Kacheln in Großserien und deren anschließende Verlegung war nur möglich, nachdem zuvor das Schema durchkonstruiert worden war.

Der Artikel nimmt leider nur kurz Bezug auf die Topkapi-Rolle, die schon vor mehr als zehn Jahren entdeckt und mathematisch ausgewertet wurde. Die Bedeutung ihrer Auswertungen für das Verstehen der Knotenmuster wird nicht erwähnt und ebenso wird die diesbezügliche Literatur nicht genannt.

Alle diese Muster, ob real (zum Beispiel Fußböden) oder als Pläne (Topkapi-Rolle), lassen sich mathematisch-geometrisch, auch wenn sie de facto durch einen Rahmen begrenzt sind, ad infinitum, also weltumspannend ausdehnen.

PETER J. LU UND PAUL J. STEINHARDT



Selbstähnlichkeit in einem Ornament am Darb-i-Imam-Schrein in Isfahan

Hierin kommt nach meiner Interpretation der weltumspannende ideologische Anspruch des Islam zum Ausdruck.

Die im Artikel angesprochenen Knotenmuster mit ihren geometrischen Figuren lassen sich auch auf das so genannte Castel del Monte/Apulien übertragen, wodurch gemäß meinen Untersuchungen offenbar wird, dass dieses Bauwerk den Herrschaftsanspruch Friedrich II. (erste Hälfte des 13. Jahrhunderts), als kaiserlichem Universalherrscher, konzentriert und potenziert zum Ausdruck bringt. Dieses Meisterwerk wurde in seiner spezifischen Gestalt nur möglich durch die geistige Nähe Friedrichs II. zum Islam und dessen oben genannte geometrische Ausdrucksformen.

Hans Pröpper, Korschenbroich

Hochrangige lachen weniger

Warum Frauen trotzdem schneller den Weg finden
Rezensionen, Oktober 2007

Männer lachen weniger, weil sie von Natur aus Einzelgänger sind? Merkwürdig, dass sie heute so sehr dazu neigen, fest strukturierte Sozialverbände zu bilden (Vereine, Armeen, die katholische Kirche). Auch die Jagd dürfte unter prähistorischen Bedingungen eher keine einsame Tätigkeit gewesen sein. Laut den Beobachtungen des Lachforschers Robert Provine ist Lachen verwandt mit Spiel und dadurch Beschwichtigung in sozial brenzligen Situationen. Beschwichtigendes oder Spielverhalten ist schlecht vereinbar mit hohem Rang. Provine stell-

te fest, dass Menschen in hochrangigen Positionen besonders wenig lachen. Vielleicht lachen Männer weniger als Frauen, weil sie häufiger hochranging sind oder es ihnen wichtiger ist, sich so zu geben. (Frauen interessieren sich meist weniger für Hierarchiekämpfe, was ihnen den Aufstieg in männlichen Sozialverbänden erschwert.) Die These »Männer sind als einsame Jäger keine Sozialwesen« scheint mir jedenfalls zweifelhaft.

Ruth Berger, Frankfurt a. M.

Leben mittels Thermodynamik definieren

Was ist Leben? Essay, Oktober 2007

Der Artikel liefert keine klaren Antworten, da die Frage »Was ist Leben?« mit den Fragen »Wie entstand Leben?« und »Wann entsteht, wann endet das Leben eines menschlichen Individuums?« vermischt werden. Dabei kann die Frage »what is life« klar beantwortet werden, seitdem Schrödinger in seinem gleichnamigen Buch (1944) »Leben« von den Hauptsätzen der Thermodynamik abgeleitet hat: Lebende Systeme sind von der Umgebung abgegrenzt, nehmen Energie aus der Umgebung auf, erhöhen damit die Ordnung innen (negative Entropie, Negentropie) und »dürfen« dies trotz des zweiten Hauptsatzes, da sie es mit einer stärkeren Entropie-Erhöhung in der Umgebung kompensieren. Daraus folgt unmittelbar, dass Leben an Zellen gebunden ist, die eine semipermeable Barriere besitzen müssen.

Das funktioniert stabil nur im flüssigen Aggregatzustand, »gasförmiges« Leben wäre instabil und »festes« Leben infolge der niedrigeren Diffusionsgeschwindigkeit extrem langsam. Für Ersteres ist ein polares Lösungsmittel erforderlich. In Mengen im Universum vorhanden sind nur Wasser und, weniger polar, Ammoniak. Methan ist zu apolar. Wegen des niedrigeren Siedepunkts von Ammoniak wäre »Ammoniak-Leben« sehr viel langsamer als »Wasser-Leben«, sodass nur Letzteres in der Existenzzeit des Universums eine halbwegs sichtbare Evolution hervorgebracht haben dürfte. Schließlich bedeutet »Negentropie« die Synthese von Makromolekülen, und das geht chemisch eigentlich nur auf Kohlenstoffbasis.

Also: Auf Grund der Hauptsätze der Thermodynamik ist Leben an Zellen gebunden, die im wässrigen Milieu Energie transformieren, im Inneren Negentropie durch Synthese von Makromolekülen auf Kohlenstoffbasis akkumulieren, und dies durch verstärkten Entropie-Anstieg in ihrer Umgebung kompensieren.

Prof. Dietrich N. Nies, Halle/Saale

Rabe Jakob spricht Dialekt

Intelligenztests für Kolkraben
Juli 2007

Beim Lesen Ihres sehr interessanten Artikels ist mir ein bemerkenswertes Erlebnis eingefallen, das ich vor etwa 20 Jahren im Innsbrucker Alpenzoo hatte. Im Rabenkäfig, in der Nähe des Gitters, stocherte ein Bewohner am Boden herum. Dazu muss ich vorausschicken: In unserer Ortschaft hatte eine Familie einen zahmen Raben, der auf den Namen Jakob hörte. Also sagte ich relativ beiläufig zu dem Zoobewohner: »Hallo Jakob.« Und der von mir sich offenbar angesprochen fühlende Rabe sagte ebenso beiläufig, aber ganz deutlich in österreichischem Dialekt: »Jo wos is?« Ich war ganz perplex, rief meine Familie herbei und erzählte ihnen mein Erlebnis. Ich wollte ihnen die Sprechkünste des Raben auch vorführen, aber er verweigerte jede weitere Aussage. Die Familie lachte nur und meinte, ich Spaßvogel wollte sie schlicht zum Narren halten.

Beim Zooshop kaufte dann mein Jüngster eine Broschüre über den Zoo, und darin stand zu lesen: »Einer der Raben kann seinen Namen Jakob sagen, und wenn man ihn anspricht, sagt er mitunter auch »Jo wos is?«.

Dipl.-Ing. Gerhard Schuecker,
Orth an der Donau, Österreich

Erratum:

Monte Carlo in der Membran
Forschung aktuell, September 2007

Das Membranprotein Sarcolipin reguliert die Aktivität einer Kalziumpumpe im Muskel. Durch einen Tippfehler wurde fälschlicherweise aus der Kalzium- eine Kaliumpumpe. Die Red.

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Thilo Körkel (Online Coordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke;
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle (Ltg.), Christina Peiberg (stv. Ltg.), Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels;
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751;
Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker, Richard Zinken (Online)
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Rainer Kayser, Dr. Susanne Lipps, Dr. Andreas Nestke, Dr. Joanna Maria Natalie Otto, Claus-Peter Sesín.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,40/sFr 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten.
Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an.
Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls;
Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen:
Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-150, Fax 030 6159005;
Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwiete 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-184, Fax 040 30183-283;
Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099;
Frankfurt: Axel Ude-Wagner, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555;
Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49;
München: Bernd Picker, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 28a vom 01. 01. 2007.

Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2007 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Chairman: Brian Napack, President: Steven Yee, Vice President and Managing Director, International: Dean Sanderson, Vice President: Frances Newburg, Circulation Director: Christian Dorbrandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

MARK A. KLINGLER, CMNH

So könnte ein Ursaurier – rekonstruiert aus seinem versteinerten Skelett – einen am Bromacker im Thüringer Wald gefundenen Fußabdruck erzeugt haben.

PALÄONTOLOGIE

Uralte Fußabdrücke identifiziert

■ Fossile Fußspuren sind keine Seltenheit. Für ihre Auswertung gibt es sogar eine Spezialdisziplin: die Paläichnologie. Da sich aber nur äußerst selten sicher feststellen lässt, welches Lebewesen einen bestimmten Abdruck hinterlassen hat, erhalten die unbekannten Verursacher der Spuren erst einmal eigene, vorläufige Artnamen.

Besonders gut erhaltene und detailreiche fossile Fußabdrücke, die teils schon seit über hundert Jahren bekannt sind, finden sich in Deutschland am Bromacker im Tambacher Becken im Thüringer Wald. In den letzten dreißig Jahren haben Paläontologen dort auch mehr als vierzig gleichfalls exzellent erhaltene Skelette von Ursauriern ausgegraben. Sie stammen aus der geologischen Formation des so genannten Rotliegenden und sind etwa 285 Millionen Jahre alt.

Der gemeinsame Fund von Skeletten und Fußabdrücken gab dem Spurenexperten Sebastian Voigt von der Bergakademie Freiberg und Kollegen aus den USA nun die Gelegenheit, eine Zuordnung zu versuchen. Tatsächlich gelang den Forschern durch genaues Vermessen der Spuren sowie der Fuß-, Bein- und Wirbelsäulenknochen der versteinerten Tiere der Nachweis, dass zwei der Abdrücke – vorläufig den hypothetischen Arten *Inchniotherium cottae* und *sphaerodactylum* zugeschrieben – von *Diadectes absitus* und *Orobates pabsti* stammen. Erstmals konnten damit die Verursacher von Fährten aus dem Erdaltertum identifiziert werden. Die beiden Ursaurier gehörten zu den ersten Festlandbewohnern und vermutlich zu den ersten Tieren, die Eier legten statt zu laichen.

Journal of Vertebrate Paleontology, Bd. 27, S. 553

ZOOLOGIE

Raubfisch mit Doppelkiefer

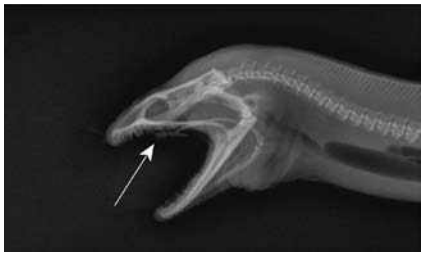
■ Muränen lauern bevorzugt in schmalen Felsspalten auf ihre Opfer. Dort sind sie geschützt und gut versteckt. Doch die Enge zwang die Tiere offenbar, einen kuriosen Fressmechanismus zu entwickeln.

Als Forscher der Universität von Kalifornien in Davis Muränen mit Röntgenstrahlen durchleuchteten, fanden sie in deren Rachen ein zweites Kieferpaar. Dieses klappt nach vorne, wenn der Raubfisch das Maul zum Zuschnappen öffnet. Es übernimmt dann die Beute von den Zähnen und befördert sie schließlich in Richtung Speiseröhre.

Andere Fische saugen Futter durch plötzliches Vergrößern ihrer Mundhöhle ein. Den Muränen in den Spalten fehlt nach Meinung der Forscher dazu schlicht der Platz. Ihr besonderes Fresssystem sorgt dafür, dass die Räuber ein Opfer nur mit den Zähnen erwischen müssen – alles Weitere übernimmt dann der zweite, ebenfalls zahnbesetzte Kiefer.

Nature, Bd. 449, S. 79

Muränen haben im Rachen (Röntgenaufnahme links) ein zweites Kiefernpaar (Pfeil). Nach dem Ergreifen der Beute mit dem Gebiss schnellt es vor, um den Happen in die Speiseröhre zu befördern (rechts).



RITA S. MEHTA, UC DAVIS

SINNE

Der Duft der Männer

■ Können Sie (andere) Männer nicht riechen? Dann haben Sie vielleicht gute Gründe dafür, aber einer steckt womöglich in Ihren Genen. Das haben Forscher an der Rockefeller-Universität in New York jetzt herausgefunden. Sie ließen Versuchspersonen an Androstenon schnuppern, einem wichtigen Bestandteil der typisch männlichen Körperausdünstungen. Während ein Drittel der Probanden den Duft als abstoßend und streng empfand, war ein weiteres Drittel entgegengesetzter Ansicht: Für diese Personen roch Androstenon angenehm nach Vanille. Der Rest konnte die Substanz überhaupt nicht wahrnehmen.

Auf der Suche nach dem Grund für die erstaunliche Diskrepanz analysierten die Forscher bei ihren Probanden das Gen für den Androstenon-Rezeptor. Dabei fanden sie zwei Varianten, die sich nur an zwei Stellen in je einem genetischen Buchstaben unterscheiden. Die eine macht ihre Träger anscheinend überempfindlich für den Duftstoff, sodass er ihnen streng vorkommt. Menschen mit der anderen Genvariante nehmen den Geruch dagegen gar nicht oder nur schwächer wahr – und empfinden ihn dann als süßlich.

Zwiespältiges Aroma: Was der Achselhöhle eines Manns entströmt, empfinden andere Menschen je nach ihrer Genausstattung höchst unterschiedlich.

FLAVIO PASTOR

Pikant an den Ergebnissen ist, dass viele Säugetiere den Duftstoff als sexuelles Locksignal einsetzen. Wie kann es da sein, dass ein Drittel der Menschheit ihn gar nicht wahrnimmt oder angewidert die Nase rümpft? Männer sind schon zu bedauern.

Nature, Bd. 449, S. 468

PLANETOLOGIE

Asteroidencrash schuf Dinokiller

Gemeinhin gilt ein Meteoriteneinschlag vor 65 Millionen Jahren, der den Chicxulub-Krater in Mexiko schuf, als Grund für den Untergang der Dinosaurier. Nun glaubt ein amerikanisch-tschechisches Forscherteam auch die genaue Herkunft der kosmischen Bombe entdeckt zu haben. Demnach entstand sie beim Zusammenstoß zweier gigantischer Gesteinsbrocken im Asteroidengürtel, der sich etwa 100 Millionen Jahre vor dem Aussterben der irdischen Riesenechsen ereignete.

Als Überbleibsel dieses gigantischen Crashs identifizierten die Wissenschaftler die Baptistina-Asteroidenfamilie. Per Computersimulation verfolgten sie die dynamische Entwicklung dieses Schwarms zurück und stellten fest, dass die mehrere tausend kilometergroßen Gesteinsbrocken von einem 170 Kilometer messenden Asteroiden abstammen, der vor etwa 160 Millionen Jahren von einem Himmelskörper mit 60 Kilometer Durchmesser gerammt wurde. Den Rechnungen zufolge gerieten einige der Trümmer unter dem Einfluss der Schwerkraft des Planeten Jupiter auf Kollisionskurs mit der Erde. Tatsächlich hat sich, wie Kraterstatistiken zeigen, nach der mutmaßlichen Kollision die Einschlaghäufigkeit von Himmelskörpern auf dem erdnahen Mond mehr als verdoppelt.

Als weitere Belege für ihre Theorie führen die Forscher Analysen von Sedimentproben und von einem Meteoriten aus der Entstehungszeit des Chicxulub-Kraters an. Demnach hatte das damals einschlagende Geschoss aus dem All die gleiche Zusammensetzung, wie sie sich aus spektroskopischen Daten für die Baptistina-Asteroiden ergibt.

Nature, Bd. 449, S. 48

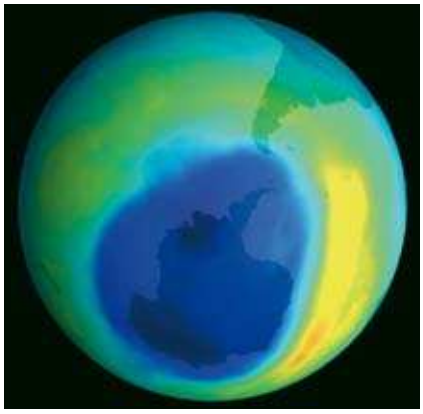
DON DAVIS / SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE

Bei einer Asteroidenkollision vor etwa 160 Millionen Jahren könnte das Trümmerstück erzeugt und auf Kollisionskurs mit der Erde gebracht worden sein, das schließlich die Dinosaurier auslöschte.

ATMOSPHÄRE

FCKWs nicht schuld am Ozonloch?

Ende Mai veröffentlichte eine Gruppe um den Nasa-Wissenschaftler Stanley P. Sander ein neues Spektrum für Dichlordioxid (Cl_2O_2). Dieses Molekül spielt in den heutigen Modellen für die Zerstörung der Ozonschicht durch Fluorchlorkohlenwasserstoffe eine entscheidende Rolle. Es entsteht, wenn Chloratome, die aus FCKWs stammen, Ozon zersetzen. Durch Sonnenlicht wird es dann photolytisch wieder in die schädlichen Chloratome und normalen Sauerstoff gespalten. So kommt es zu einem Kreislauf der Ozonzerstörung.



NASA, GSFC, TOMS SCIENCE TEAM & SCIENTIFIC VISUALIZATION STUDIO

Nach dem neuen Spektrum absorbiert Cl_2O_2 aber in den für die Photolyse relevanten Spektralbereichen deutlich weniger Sonnenlicht als bisher gedacht. Damit läuft auch die Spaltungsreaktion nur ein Sechstel so schnell ab.

Mitte September berichtete Markus Rex von der Forschungsstelle Potsdam des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung bei einem Treffen von Stratosphärenforschern in Bremen über die Ergebnisse von Berechnungen, bei denen er die revidierte Geschwindigkeitskonstante in das chemische Modell der Ozonzerstörung eingesetzt hatte. Demnach könnte Chlor aus FCKWs höchstens vierzig Prozent des Ozonlochs in der Antarktis erklären.

Das Ozonloch 2006 war das größte, das jemals beobachtet wurde. Das gängige Erklärungsmodell dafür hat durch neue Messungen nun seinerseits ein Loch bekommen.

Noch gibt es für das neue Spektrum keine unabhängige Bestätigung. Allerdings stammt es von einer besonders reinen Probe, die nach einem verbesserten Verfahren hergestellt wurde. Wenn die jetzigen Labormessungen korrekt sind, schließt das nicht aus, dass Chlor doch die Schuld an der Ozonzerstörung trägt – wofür weiterhin vieles spricht. Aber ein entscheidendes Glied im Mechanismus muss bisher übersehen oder zumindest falsch dargestellt worden sein.

Nature online News, 26. 9. 2007

JUDSON W. PARTIN, GEORGIA TECH

Stalagmiten aus Höhlen auf Borneo, von denen hier einer angebohrt wird, lieferten das erste Klimaarchiv für den tropischen Pazifik während der letzten 27 000 Jahre.

KLIMA

Mittler zwischen Nord und Süd

Eisbohrkerne, Sedimentschichten und Baumringe gehören zu den Zeugen aus der Vergangenheit, mit deren Hilfe Wissenschaftler die Klimageschichte der Erde rekonstruieren. Forscher um Judson W. Partin vom Georgia Institute of Technology in Atlanta haben dafür nun auch Stalagmiten aus Tropfsteinhöhlen auf Borneo herangezogen. In den verschiedenen Wachstumsschichten bestimmten sie radiologisch das jeweilige Alter und über das Verhältnis der Sauerstoffisotope $^{18}O/^{16}O$ die einstige Niederschlagshäufigkeit. So konnten sie erstmals ein lückenloses Klimaarchiv für den tropischen Westpazifik in den vergangenen 27 000 Jahren erstellen.

Lange sah es so aus, als bestünde kein Zusammenhang zwischen den Klimaschwankungen auf der Nord- und Südhalbkugel. Neuerdings gibt es jedoch Hinweise, dass beide Systeme miteinander gekoppelt sind. Das Klimaarchiv aus Borneo bestätigt das, indem es sowohl Ereignisse im Nordatlantik wie auf der Antarktis widerspiegelt. Dadurch erscheint der tropische Pazifik nun als Vermittler zwischen den Vorgängen auf den beiden Erdhälften.

Besonders auffällig ist eine Trockenphase auf Borneo, die vor etwa 20 000 Jahren einsetzte und genau vor 16 500 Jahren ihren Höhepunkt erreichte, als im Nordatlantik ein so genanntes Heinrich-Ereignis – eine abrupte Klimaänderung – auftrat. Demnach könnten die Verhältnisse im tropischen Pazifik das Geschehen in höheren Breiten auch beeinflusst, wenn nicht gar ausgelöst haben.

Nature, Bd. 449, S. 452

VERHALTEN

Zweisprachige Vogelchefs

In Sachen Gruppenhierarchie herrschen bei Mahaliwebern klare Verhältnisse. Hat ein Männchen die Führungsrolle übernommen, bleibt es für den Rest seines Lebens unangefochtener Chef der Singvögelkolonie. Als äußeres Zeichen dafür wachsen ihm die Hoden, bis sie etwa dreimal so groß wie bei seinen männlichen Untergebenen sind. Zugleich ändert sich der Gesang:

Nur dem dominanten Mahaliweber-Männchen (rechts) ist Sologesang erlaubt. Sein Untergebener (links) muss sich mit Gezwitscher im Duett oder Chor begnügen.

CORNELIA VOIGT, MPI FÜR ORNITHOLOGIE

Während die rangniederen Vögel nur im Duett oder im Chor zwitschern, gibt das Oberhaupt während der Brutzeit ein tägliches Solo bei Sonnenaufgang.

Wie Forscher um Cornelia Voigt vom Max-Planck-Institut für Ornithologie in Seewiesen jetzt ermittelt haben, schlägt sich die neue Rolle auch in veränderten Hirnstrukturen nieder. So sind die beiden Areale, die das Erlernen und Produzieren von Gesang steuern, bei den Alpha-Männchen um dreißig Prozent vergrößert. Offenbar bedingt der höhere Rang eine Umorganisation der entsprechenden Gehirngebiete.

Wie das im Einzelnen geschieht, ist noch nicht geklärt. Fest steht aber, dass der Aufstieg zum dominanten Männchen für die Tiere eine echte Herausforderung bedeutet – vergleichbar mit dem Erwerb einer Zweitsprache müssen sie zusätzlich zum normalen Gesang ein weiteres, gänzlich anderes Silbenrepertoire erlernen, um bei Sonnenaufgang bestehen zu können.

Proceedings of the Royal Society B, Bd. 274, S. 2645

ASTRONOMIE

Magellan-Wolken nur auf Stippvisite

Die Große und die Kleine Magellansche Wolke sind zwei Galaxien in unserer unmittelbaren kosmischen Nachbarschaft und gehören damit zur Lokalen Gruppe. Bislang galten sie als Satelliten der Milchstraße, die von Anfang an gravitativ an unsere deutlich massereichere Heimatgalaxie gebunden waren. Wie eine Forschergruppe unter Gurtina Besla vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics jetzt herausfand, ist diese altvertraute Vorstellung jedoch falsch.

Schon Anfang des Jahres ergaben genaue Geschwindigkeitsmessungen der Magellan-Galaxien in allen drei Raumrichtungen, dass sie überraschend schnell durchs All driften. Die Forschungsgruppe aus Harvard hat anhand dieser Daten nun die genaue Bahn der beiden galaktischen Wolken berechnet.

ROBERT GENDLER UND JOSCH HAMBSCH, HARVARD-CFA

Die Große Magellansche Wolke und ihr kleinerer Begleiter sind nach neuen Messungen keine Satelliten der Milchstraße, sondern nur Besuch.

Demnach bewegen sie sich auf einer Parabel. Das aber bedeutet, dass sie der Milchstraße nur einen vorübergehenden Besuch abstatten.

Diese neuen Erkenntnisse werfen eine Reihe theoretischer Modelle über den Haufen. So erklärten die Astronomen die Verkippung unserer scheibenförmigen Milchstraße mit der langfristigen Anwesenheit der Magellan-Wolken und den daraus resultierenden Gezeitenkräften. Ebenso ließ sich die gigantische Wasserstoffwolke, welche die beiden Zwerggalaxien hinter sich herziehen, auf die wiederholte Wechselwirkung mit unserer Heimatgalaxie zurückführen. Diese Phänomene bedürfen nun neuer Erklärungen.

Astrophysical Journal, im Druck

Mitarbeit: J. Maier, R. Gast und C. Marty

Klimawandel öffnet Nordwestpassage

Der Sommer 2007 brachte eine Rekordschmelze in der Arktis – deutliches Zeichen der globalen Erwärmung. Auf dem Höhepunkt der Tauperiode Mitte September bedeckte das Meereis nur noch eine Fläche von 4,13 Millionen Quadratkilometern – 38 Prozent unter dem langjährigen Mittel und 24 Prozent unter dem bisherigen Minimum vor zwei Jahren. Dadurch war erstmals seit Langem – vielleicht Jahrmillionen – die Nordwestpassage zwischen Europa und Asien mehrere Wochen lang eisfrei (gelbe Linie). Die noch kürzere Nordostpassage blieb dagegen durch eine Eiszunge vor Sibirien blockiert. Das Bild ist eine Überlagerung von Mikrowellendaten des Satelliten »Aqua« mit dem »Blue Marbel« der Nasa.

NASA, GSFC, SVS, WALEED ABDALATI UND NSIDC, WALT N. MEIER

PHARMAZIE Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Der Pille auf der Spur

Die Abschirmwände sind meterdick und aus einer Speziallegierung gefertigt. Dahinter erproben Forscher ein neues Verfahren, auf unschädliche Weise den Weg von Tabletten im Körper zu verfolgen.

Von Thorsten Braun

Manche Tabletten haben es eilig: Sie wandern schnell durch Magen und Darm und geben ihren Wirkstoff gleichmäßig ab. Andere dagegen trödeln, verbringen viel Zeit in den ersten Abschnitten des Verdauungstrakts und legen erst später einen Zahn zu. Für Mediziner ist es wichtig, diese Eigenschaften zu kennen; denn die Wirkung einer Arznei hängt nicht nur von der Dosis ab, sondern auch davon, wo und wie schnell sie im Magen-Darm-Trakt aufgenommen wird.

Um den Weg einer Tablette von außen zu verfolgen, waren Forscher bisher darauf angewiesen, das Medikament radioaktiv zu markieren. Das macht die Experimente problematisch; denn als Probanden dienen gesunde Menschen – und die dürfen gemäß den Strahlenschutzbestimmungen in Deutschland nicht ohne triftigen Grund radioaktiver Strahlung ausgesetzt werden. Entsprechend wenige Erkenntnisse gibt es bislang über die Absorption von Tabletten.

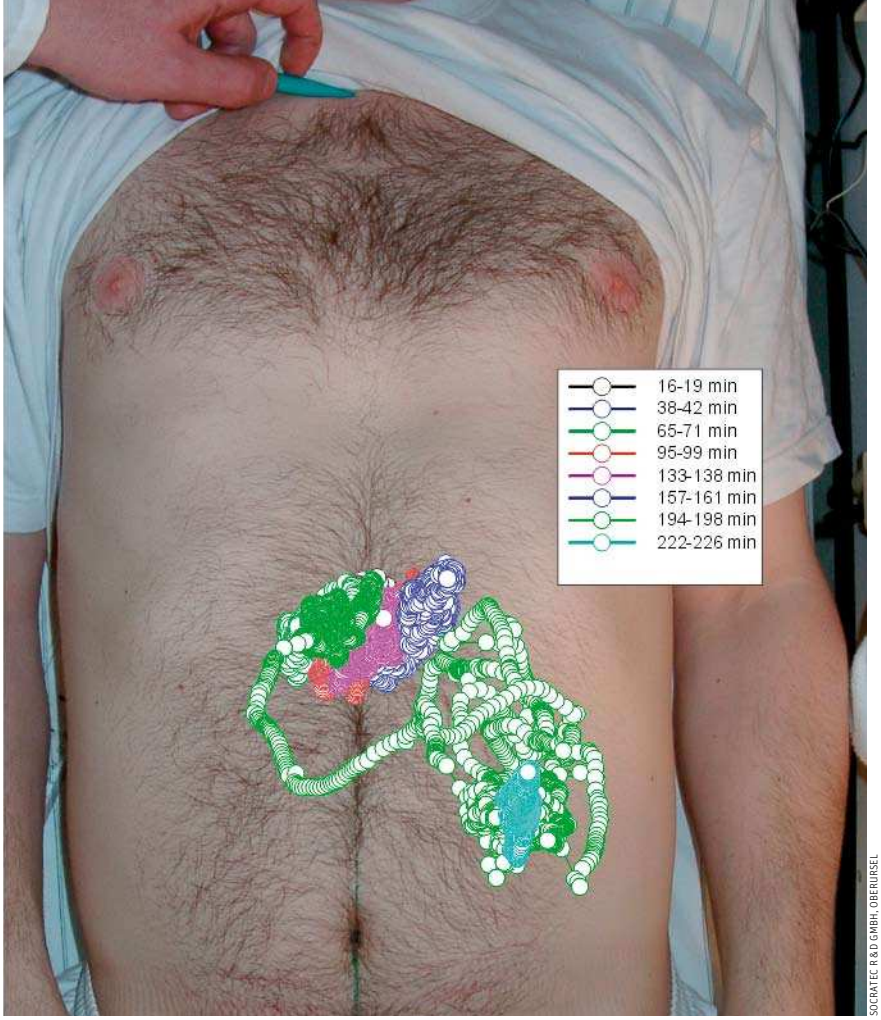
Mit einer neuen Methode, die Forscher der Universität Greifswald und der Berliner Charité zusammen mit dem Berliner Institut der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) entwickelt haben, könnte sich das bald ändern. Magnetische Kräfte sollen künftig dabei helfen, den Weg von Tabletten zu verfolgen. Bislang haben die Forscher das so genannte Magnetic Marker Monitoring nur experimentell genutzt. Zusammen mit der Oberurseler Firma Socratec wollen sie nun herausfinden, ob sich das Verfahren auch für klinische Tests eignet.

Die ersten Experimente machte Werner Weitschies, Professor für Pharmazie an der Universität Greifswald, schon vor rund zehn Jahren. Er hatte die Idee, Tabletten mit einer geringen Menge einer ferromagnetischen Substanz anzureichern – dem Eisenoxid Fe_3O_4 beispielsweise. In einem starken Magnetfeld lässt sich die Pille dann magnetisieren. »Sie wird in einen kleinen Magneten umgewandelt«, erläutert Weitschies. Anschließend kann man das Magnetfeld der Tablette auf ihrem Weg durch den Körper so lange verfolgen, bis sie sich aufgelöst hat.

Laut Weitschies handelt es sich um ein sanftes Verfahren: »Das verwendete Eisenoxid ist nicht giftig und daher für die Probanden völlig unbedenklich.« Die Substanz werde auch als schwarzer Farbstoff in Lebensmitteln wie Kaviar, Oli-

SOCRATEC R & D GMBH, OBERURSEL

Dieses würfelförmige Gebäude der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Berlin enthält den magnetisch am besten abgeschirmten Messraum der Welt – ein idealer Ort für Versuche, mit einem hochempfindlichen Detektor magnetisierte Tabletten im Verdauungstrakt zu lokalisieren (eingeklinktes Foto).



SOCRATEC R & D GMBH, OBERURSEL

Drei Stunden lang lag die magnetisierte Tablette dem Probanden im Magen, bevor sie dann sehr schnell in den Dünndarm wanderte und sich dort auflöste.

ven oder Süßwaren verwendet und unverändert vom Körper wieder ausgeschieden.

Das Magnetfeld einer derart präparierten Tablette ist allerdings schwach. Es erreicht – um einen Vergleich zu nennen – nur rund ein Hunderttausendstel des Wertes von Haftmagneten, mit denen man etwa Notizzettel an der Kühlschranktür befestigen kann. »Wir brauchen daher hochempfindliche Sensoren, um das Magnetfeld der mit Eisenoxid präparierten Tabletten überhaupt nachzuweisen«, erklärt Weitschies. Der Messraum muss zudem gut abgeschirmt sein, damit das Ergebnis nicht durch Magnetfelder aus der Umgebung oder das Erdmagnetfeld verfälscht wird.

Hier kommt die PTB ins Spiel. Sie verfügt in Berlin über den am besten abgeschirmten Messraum weltweit. Ungefähr drei mal drei Meter groß, ist er von mehreren Schichten einer speziellen Metalllegierung umgeben. Diese Abschirmung füllt den Rest des würfelförmigen Gebäudes mit einer Seitenlänge von 15 Metern aus.

Die Messungen sind allerdings eine Geduldsprobe für die Versuchsteilnehmer. Sobald der Proband die Tablette eingenommen hat, muss er sich in dem abgeschirmten Raum unter die hochempfindlichen Sensoren eines Detektors legen. Diese registrieren das Magnetfeld der Tablette und damit ihren Weg durch den Körper. Das Experiment dauert sechs bis 24 Stunden – je nachdem, wie schnell die Pille zerfällt.

»Stop and go« in den Eingeweiden

»Der Proband muss aber nicht die ganze Zeit unter dem Gerät liegen – er darf sich alle fünfzehn Minuten die Füße vertreten«, sagt Henning Blume, Geschäftsführer von Socratec. Das fördere die Bewegungen des Magen-Darm-Trakts und mache die Messungen wirklichkeitsnäher. Die Sensoren erfassen das Magnetfeld der Tablette 250-mal pro Sekunde. Ein Computer wandelt die aufgezeichneten Messwerte in dreidimensionale Bilder um.

Zusammen mit seinen Kollegen hat Blume bereits einige interessante Erkenntnisse gewonnen: »Tabletten, die mit wenig Flüssigkeit oder in liegender Position eingenommen werden, können in der Speiseröhre stecken bleiben und dort zerfallen«, sagt er. Zudem stellte das Team fest, dass die Pillen alles andere als gleichmäßig durch Magen und Darm transportiert werden. »Die meisten bewegen sich ruckartig«, erzählt Weitschies. »Sie werden innerhalb weniger Sekunden um zehn bis fünfzig Zentimeter von einem Ort zum nächsten transportiert und verbleiben dort manchmal bis zu dreißig Minuten.«

Drei Jahre lang wollen die Forscher von Socratec das Verfahren nun erproben. Dabei soll es so weit optimiert werden, dass es als Standardmethode Eingang in die Arzneimittelentwicklung findet. Socratec testet im Auftrag von Pharmafirmen in klinischen Studien die Verträglichkeit von Medikamenten an gesunden Probanden. Bei diesen Untersuchungen möchte die Firma auch das Magnetic Marker Monitoring einsetzen.

»Wir wollen unter anderem die Frage beantworten, warum manche Tabletten unterschiedlich schnell zerfallen – je nachdem ob sie vor dem Essen oder danach eingenommen werden«, sagt Blume. Das gilt etwa für einige Bluthochdruckpräparate mit dem Wirkstoff Nifepidin. Werden sie nach dem Essen geschluckt, steigt die Konzentration des Mittels im Blut zehnmal so hoch wie bei Einnahme vor der Mahlzeit. Erklären können sich die Forscher das paradoxe Phänomen bislang nicht.

Das neue Verfahren dürfte auch helfen, Tabletten so maßzuschneidern, dass sie ihren Wirkstoff nur in einem bestimmten Darmbereich abgeben. Wichtig ist das zum Beispiel beim Morbus Crohn, einer chronischen, schubweise verlaufenden Entzündung der Darmwand. Zur Behandlung des akuten Schubs werden meist Kortisonpräparate eingesetzt. Obwohl die Entzündung fast immer nur den letzten Teil des Dünndarms oder den Dickdarm befällt, setzen diese Tabletten den entzündungshemmenden Wirkstoff schon vorher frei. Das Kortison gelangt dadurch über den Blutkreislauf in den Körper und löst dort unerwünschte Nebenwirkungen aus. »Das Magnetic Marker Monitoring könnte uns dabei helfen, eine Tablettenform zu entwickeln, die den Wirkstoff erst in den hinteren Darmabschnitten freisetzt und die Symptome dadurch lokal bekämpft«, sagt Blume.

Weitschies hat sich inzwischen ein neues Ziel gesetzt. »Bislang können wir den Weg unterschiedlicher Tabletten, die der Proband gleichzeitig einnimmt, nicht parallel verfolgen«, erklärt der Pharmakologe. »Wir empfangen immer nur ein einziges Summensignal.« Er will das Computerprogramm nun so abwandeln, dass es die Position von bis zu fünf unterschiedlichen Tabletten getrennt erfasst und abbildet. So lassen sich auch gegenseitige Beeinflussungen feststellen. Davon könnten die vielen Patienten profitieren, die mehrere Präparate zugleich einnehmen müssen. Sie wüssten dann, was besser ist: die Tabletten alle gleichzeitig oder lieber einzeln in zeitlichem Abstand zu schlucken.

Thorsten Braun ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

TEILCHENPHYSIK

Per Abkürzung durch die Raumzeit

Liefert ein Neutrino-Experiment erste handfeste Hinweise auf zusätzliche Raumdimensionen, wie die Stringtheorie sie fordert?

Von Mark Alpert

Das Neutrino ist der Außenseiter im Teilchenzoo. Ungeladen und fast masselos, lässt es sich kaum je mit anderen Partikeln ein. Dafür erscheint das Geisterteilchen in dreierlei »Gestalten« – Elektron, Myon und Tau –, zwischen denen es nach Belieben wechselt, während es einsam und so gut wie ungehindert durch das Universum rast. Wie schnell die Oszillationen zwischen den verschiedenen Erscheinungsformen oder fachsprachlich Flavors (»Geschmacksrichtungen«) ablaufen, ist bisher unklar. Doch unter Umständen hängt das physikalische Weltbild davon ab.

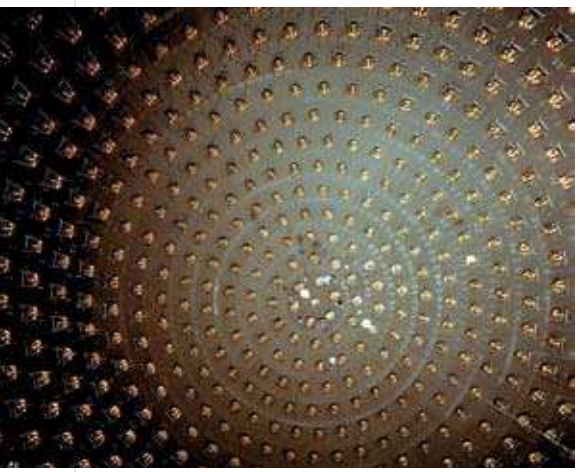
In den letzten fünf Jahren haben Wissenschaftler am Fermi National Accelerator Laboratory in Batavia (Illinois) Strahlen aus Myon-Neutrinos auf eine zwölf Meter dicke, mit 800 Tonnen Mineralöl gefüllte Stahlkugel geschossen, um herauszufinden, wie viele der Teilchen sich unterwegs in Elektron-Neutrinos umwandeln. Kürzlich gab das Forschungsteam die ersten Ergebnisse dieses »miniature booster neutrino experiment« oder kurz MiniBooNE bekannt. Diese bestätigten zwar im Wesentlichen das etablierte Standardmodell der Teilchenphysik. Doch zeigte sich eine bedeutsame Ausnahme, und die könnte den ersten experimentellen Beleg für eine viel versprechende Alternative liefern: die Stringtheorie.

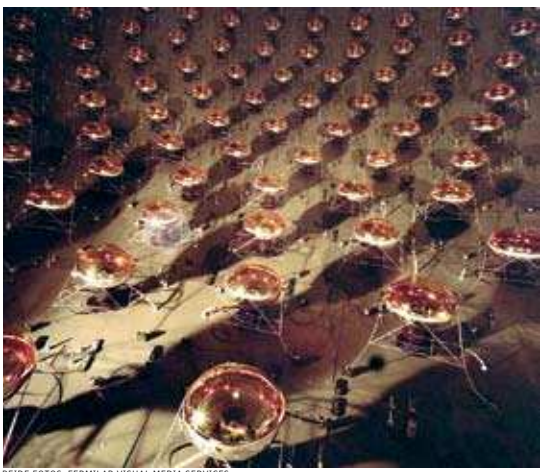
Neutral und zudem steril

Ziel von MiniBooNE war es, die Ergebnisse eines früheren Experiments zu überprüfen, das in den 1990er Jahren am Los Alamos National Laboratory lief. Damals hatten sich Hinweise auf einen vierten Neutrinotyp ergeben. Dieses hypothetische Teilchen wäre noch schwerer fassbar als seine drei Verwandten. Anders als sie würde es auch von der schwachen Kernkraft nicht beeinflusst und mit dem Rest der Welt folglich nur über die Gravitation wechselwirken. Solche »sterilen« Neutrinos passen nicht in das Standardmodell. Deshalb reagierten die Teilchenphysiker elektrisiert und wollten die Existenz der Exoten schnellstmöglich bestätigen oder widerlegen.

Auf den ersten Blick waren die Ergebnisse von MiniBooNE ernüchternd, indem sie die früheren Befunde als falsch entlarvten: Für Neutrinos mit Energien zwischen 475 Millionen und 3 Milliarden Elektronenvolt entsprach die Anzahl der Oszillationen ziemlich genau den Vorhersagen des Standardmodells. Bei niedrigeren Energien zeigte sich allerdings ein geringer, aber statistisch relevanter Überschuss an Elektron-Neutrinos.

Aufregend daran ist, dass drei Theoretiker genau das vorhergesagt hatten. Ihre Schlussfolgerung fußte auf der Stringtheorie, die eine Brücke zwischen Quantenmechanik und Gravitationstheorie schlägt. Ihr zufolge besteht die Welt aus winzigen Fädchen, die wie Saiten (englisch: strings) schwingen. Eine Besonderheit dieser Theorie ist, dass sie mindestens zehn Dimensionen postuliert. Wa-





Ein Blick ins Innere des MiniBooNE-Tanks (links), bevor er mit ultrareinem Mineralöl gefüllt wurde, zeigt die Anordnung der Fotomultiplierröhren (rechts) auf der Innenwand der Stahlkugel. Sie dienen zum Nachweis der Lichtblitze, die als Folge der Wechselwirkung von Neutrinos mit Teilchen im Mineralöl des Detektors entstehen.

BEIDE FOTOS: FERMILAB VISUAL MEDIA SERVICES

rum wir sechs davon nicht wahrnehmen, könnte daran liegen, dass die gewöhnlichen Teilchen in unserem Universum auf eine vierdimensionale »Bran« beschränkt sind, die wie eine riesige Luftschlange in der höherdimensionalen Umgebung schwebt.

Bestimmte Teilchen – darunter das Graviton, das in der Stringtheorie die Schwerkraft vermittelt – können jedoch die Bran verlassen oder in sie eintreten. 2005 kamen Heinrich Päs, heute an der Universität von Alabama, Sandip Pakvasa von der Universiät von Hawaii und Thomas J. Weiler von der Vanderbilt-Universität zu dem Schluss, dass auch das sterile Neutrino über diese Fähigkeit verfügen sollte. Demnach könnte es, wenn die Bran gebogen oder mikroskopisch verformt ist, Abkürzungen durch die höherdimensionale Umgebung nehmen. Das würde sich auf die Oszillationen zwischen den Neutrinotypen auswirken und insbesondere die Wahrscheinlichkeit eines Identitätswechsels bei bestimmten Energien drastisch erhöhen.

Wie sich herausstellte, passen die Ergebnisse von MiniBooNE ausgezeichnet zu den Vorhersagen von Päs, Pakvasa und Weiler. Mehrere am Experiment beteiligte Forscher waren so beeindruckt von der Übereinstimmung, dass sie die drei Theoretiker per E-Mail beglückwünschten. »Es ist einfach verblüffend, wie gut euer Modell unseren Überschuss an Niederenergie-Ereignissen reproduziert«, schrieb Bill Louis, einer der Sprecher des MiniBooNE-Teams. Weil es bisher keinerlei experimentelle Belege für die Stringtheorie gibt, wäre eine Bestätigung für die Existenz überzähliger Dimensionen ein sensationeller Durchbruch.

Andere Physiker warnen jedoch, dass die Übereinstimmung bloßer Zufall sein könnte. Die MiniBooNE-Forscher unterziehen ihre Daten jetzt einer strengen Nachkontrolle, um festzustellen, ob vielleicht unerwartete Hintergrundeffekte oder Fehler bei der Auswertung das Ergebnis verfälscht haben. Parallel dazu verfeinern Päs und seine Kollegen ihre theoretische Ableitung. »Unsere Lösung scheint auf den ersten Blick vielleicht etwas spekulativ«, räumt der Forscher ein. »Aber ich halte es für völlig legitim, mögliche Szenarien zu diskutieren, die den Überschuss – sofern er sich bestätigt – erklären können.«

Mark Alpert ist Redakteur bei Scientific American.

SINNESPHYSIOLOGIE

Die Maus, die in die Kälte ging

Woran merkt unser Körper eigentlich, dass es kalt ist? Bei Mäusen wurde jetzt ein inneres Thermometer gefunden. Wird es gestört, können die Tiere mäßige Kälte nicht mehr spüren.

Von Michael Groß

Von den Sinneswahrnehmungen des Menschen sind das Sehen und Hören weitaus am besten erforscht. Tast-, Geschmacks-, Geruchs- und Temperaturempfinden wurden von der Wissenschaft dagegen lange eher stiefmütterlich behandelt.

So dauerte es bis 1997, ehe ein Team um David Julius an der Universität von Kalifornien in San Francisco den ersten molekularen Temperatursensor entdeckte. Ausgangspunkt war die gewagte Vermutung, dass das »Brennen« beim Genuss von Chili mit der Empfindung echter Hitze verwandt sei.

Diese Annahme erwies sich als goldrichtig. Bei der Suche nach zellulären Andockstellen für den aktiven Bestandteil der Chilischoten – das Capsaicin – stießen die Forscher auf den Vanilloid-Rezeptor VR1: einen Ionenkanal, der nur gleichsam versehentlich auch auf das Gewürz anspricht. Seine eigentliche Aufgabe ist es dagegen, Hitze zu melden.

Nach diesem Erfolg wandten Julius und seine Mitarbeiter denselben Analo-

FORTIS
LIMITED EDITION
B-42 Marinemaster Chronograph Alarm
Chronometer C.O.S.C.
300 Exemplare, Automatik Kaliber F2001-5
Saphirglas entspiegelt, wasserdicht 200 m / 20 bar
Offizieller Ausrüster für Luft- und Raumfahrt
Erste Uhrenfabrik der Welt für automatische
Armbanduhren · since 1912 swiss
www.fortis-watch.com

DAVID JULIUS LAB, UCSF

Mäuse mit ausgeschaltetem Gen für den Ionenkanal TRPM8 spazieren zwar auch nicht gerne über Eis, sind gegen mäßige Kälte aber unempfindlich.

gieschluss auf der anderen Seite der Temperaturskala an – und landeten einen weiteren Treffer. Die Fahndung nach Membranrezeptoren für Kühle vermittelnde Moleküle wie Menthol führte sie im Jahr 2002 auf den ersten biologischen Kältesensor. Auch er ist ein Ionenkanal und trägt den Namen TRPM8 *(transient receptor potential melastatin 8)* oder CMR1 *(cold and menthol receptor 1)*.

In Laborversuchen ließ das Molekül nicht nur in Gegenwart von Menthol, sondern auch bei Temperaturen unter 26 Grad Kalzium-Ionen in die Zelle eindringen. Die Forscher vermuteten, dass dieser Zustrom als Signal wirkt, das im lebenden Organismus einen Nervenreiz auslöst und so letztendlich eine Kälteempfindung hervorruft. Später präsentierten andere Gruppen allerdings abweichende Kandidaten für die Wahrnehmung tiefer Temperaturen, darunter einen mutmaßlichen Sensor für extreme Kälte. Was stimmte nun?

Um Klarheit zu schaffen, erzeugten Julius' Arbeitsgruppe und unabhängig von ihr zwei weitere Teams deshalb so genannte Knock-out-Mäuse, in denen das Gen für TRPM8 defekt war. Untersuchungen an ihnen bestätigten jetzt übereinstimmend, dass der betreffende Ionenkanal bei der Wahrnehmung tiefer Temperaturen eine Rolle spielt *(Nature, Bd. 448, S. 204; Neuron, Bd. 54, S. 371 und S. 379)*. So blieben bei isolierten Nervenzellen aus den genmanipulierten Tieren die üblichen Kältereaktionen aus; auf Hitze sprachen die Neuronen dage-

KOMMENTAR: STAMMZELLFORSCHUNG Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Viel Lärm um Nichts

Die Schaffung von Tier-Mensch-Embryonen zu Forschungszwecken – vor Kurzem in Großbritannien genehmigt – ist nicht nur aus medizinischer Sicht, sondern vor allem auch aus ethischen Gründen zu begrüßen.

Von Edgar Dahl

Nur einen Tag, nachdem Großbritannien seinen Stammzellforschern grünes Licht für die Erzeugung von Tier-Mensch-Embryonen gegeben hatte, erhob sich in Deutschland der übliche Sturm der Entrüstung. Der Präsident der Bundesärztekammer, Jörg-Dietrich Hoppe, sah in den geplanten Experimenten eine gefährliche »Grenzüberschreitung«. Der CDU-Abgeordnete Hubert Hüppe griff gleich zum nächstgrößeren unter den bewährten Knüppeln und nannte das Vorhaben »menschenverachtend« sowie »ethisch nicht hinnehmbar«. Sein Parteifreund Peter Liese, Mitglied des Europaparlaments in Straßburg, glaubte gar zu wissen, dass US-Wissenschaftler bereits darüber nachdächten, »ob man den Mangel an Spenderorganen nicht dadurch mindern kann, dass man Mischlebewesen aus Mensch und Tier weiterentwickelt und im ausgewachsenen Stadium Organe entnimmt«.

Manche Politiker haben offenbar zu viele Horrorfilme gesehen. Natürlich geht es bei den zwei Anträgen zur Schaffung von Tier-Mensch-Embryonen für Forschungszwecke, denen die britische Human Fertilisation and Embryology Authorothy am 5. September ihr Plazet erteilte, nicht darum, etwa ein künstliches Gegenstück des berühmten »Elefantenmenschen« zu kreieren, um es später auszuweiden. Ziel ist einzig die Produktion zusätzlicher embryonaler Stammzelllinien für spezielle medizinische Untersuchungen. Davon versprechen sich Forscher Durchbrüche bei der Behandlung von Erkrankungen wie Alzheimer, Parkinson oder Leukämie.

Embryonale Stammzellen können sich noch zu allen Arten von Körpergewebe entwickeln. Diese Eigenschaft, die man als Pluripotenz bezeichnet, macht sie medizinisch so wertvoll. Gewöhnlich werden sie Embryonen am fünften Tag nach deren Entstehung entnommen (was in Deutschland allerdings verboten ist).

Als Quelle dienen bislang fast ausschließlich überzählige Embryonen aus Reagenzglasbefruchtungen. Diese können den Bedarf aber nicht decken. Deshalb sind amerikanische und britische Forschungszentren dazu übergegangen, junge Frauen durch finanzielle Anreize zum Spenden von Eizellen zu bewegen, die dann künstlich besamt werden. Da eine solche Spende jedoch nicht ohne medizinische Risiken ist und die Gefahr besteht, dass Frauen aus rein pekuniären Gründen ihre Gesundheit aufs Spiel setzen, wird schon seit geraumer Zeit über alternative Quellen für embryonale Stammzellen nachgedacht.

Als nicht nur medizinisch, sondern auch ethisch optimale Lösung bietet sich dabei an, Eizellen von Tieren zu verwenden, deren Kern man durch den einer menschlichen Zelle ersetzt. Die auf diese Weise gezeugten »Hybride« enthalten über 99 Prozent menschlicher und weniger als 1 Prozent tierischer DNA. Letztere befindet sich in den Mitochondrien, den Zellkraftwerken, die über eine geringe Menge eigenes Erbgut verfügen. Weil im Prinzip lediglich das Zytoplasma der tierischen Eizellen

gen weiterhin an. Auch die Knock-out-Mäuse selbst erwiesen sich als unempfindlich gegen tiefe Temperaturen – zumindest bis zu einem gewissen Grad. Ansonsten verhielten sie sich völlig normal.

In den Versuchen durften die Nager zwischen einem dreißig Grad warmen und einem kälteren Untergrund wählen. Normale Tiere zeigten schon bei einer Temperaturdifferenz von nur fünf bis zehn Grad eine deutliche Präferenz für den wärmeren Boden. Die Knock-out-Mäuse schienen den Unterschied dagegen nicht zu spüren und hielten sich in beiden Bereichen gleich häufig auf. Erst ab Temperaturen von 15 Grad begannen auch sie die kältere Region zunehmend zu meiden. Wenn der Boden dort nur noch fünf Grad warm war, zeigten die Knock-out-Mäuse schließlich annähernd die gleiche Aversion dagegen wie normale Tiere.

Demnach gibt es auf dem biologischen Thermometer der Maus, das vermutlich unserem eigenen sehr ähnlich ist, zwei Arten von Kälte. Die eine ist eine leicht unangenehme Kühle, für die TRPM8 als Sensor dient. Bei der anderen handelt es sich dagegen um tiefere Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt, die lebensbedrohlich sein können. Für ihre Wahrnehmung sind deshalb gesonderte molekulare Antennen zuständig.

Allerdings fragt sich, ob wir damit wirklich alle Elemente unseres biologischen Thermometers kennen. Auch bleibt unklar, was sich in den Übergangsbereichen abspielt – also etwa dort, wo unangenehme Kühle in bedrohliche Kälte übergeht. Offen ist schließlich, wie die Kältesensoren die Regulierung der Körpertemperatur beeinflussen. Knock-out-Tiere könnten eine Chance bieten, das genauer herauszufinden. Die Maus, die mutig in die Kälte geht, kann uns also noch manches lehren.

Michael Groß ist promovierter Biochemiker und Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

erhalten bleibt, sprechen Fachleute auch von Cybrids, nach englisch »cytoplasmic hybrid embryos«.

Hybrid-Embryonen aus zwei Tierarten sind lange bekannt und wurden schon vor über hundert Jahren erstmals erzeugt. Sie haben jedoch praktisch nichts mit den heutigen Cybrids gemeinsam; denn sie werden aus der Verschmelzung von Ei- und Samenzellen getrennter Arten erzeugt und enthalten deshalb jeweils die Hälfte des Erbguts beider Ausgangstiere.

Über die ersten Cybrids mit menschlichem Erbgut hat eine chinesische Forschergruppe 2003 berichtet: Sie benutzte entkernte Kaninchen-Eizellen und konnte aus den erhaltenen Embryonen verwertbare Stammzellen isolieren. 2006 gelang es einem US-Team, das menschliche Erbgut in die Eizellen von Kühen zu übertragen.

Anders als von den Kritikern und auch in der Öffentlichkeit weithin angenommen, sind die Stammzellen, die man den Cybrids zu entnehmen gedenkt, aber nicht für die klinische Anwendung vorgesehen: Niemand hat vor, sie auf Patienten zu übertragen. In den bewilligten Projekten der britischen Wissenschaftler geht es ausschließlich um Grundlagenforschung. Dazu gehören insbesondere Untersuchungen über die Entstehung und medikamentöse Behandlung degenerativer Erkrankungen. In diesem Fall würden die Mediziner etwa Alzheimer-Patienten Körperzellen entnehmen, den Kern in tierische Eizellen transferieren und diese zur Entwicklung bringen. Aus den so gewonnenen embryonalen Stammzellen könnten sie dann Nervenzellen züchten, um daran die Krankheitsprozesse zu erforschen und potenzielle Medikamente zu testen.

Das ehrgeizigste Ziel bei der Arbeit mit Cybrids ist jedoch herauszufinden, wie sich das spezialisierte Genom von Körperzellen erwachsener Menschen in den embryonalen Zustand zurückversetzen lässt. Gelingt diese Reprogrammierung, können wir pluripotente Stammzellen, die für die Züchtung von Ersatzgewebe oder für andere neuartige Therapien erforderlich sind, direkt aus normalen Körperzellen des Patienten erzeugen, ohne auf menschliche Eizellen oder gar Embryonen zurückgreifen zu müssen. Ein solches Forschungsvorhaben verdient daher keine moralische Verdammung, sondern unsere volle Unterstützung.

Edgar Dahl ist promovierter Bioethiker an der Universität Gießen und Sprecher der Deutschen Gesellschaft für Reproduktionsmedizin.

wichtige**online**adressen

academics.de –
das Karriereportal der Wissenschaft
www.academics.de

Der Ambulante Bibliotheksservice
Inventarisierung, Katalogisierung
Wissen nutzen können !
www.AraDet.de

arceoTon –
der Podcast zur Archäologie
www.arceoton.de

Bücher,
die die Welt bewegen
www.astronovia.de

ingenieurkarriere.de –
der Stellenmarkt für Ingenieure
www.ingenieurkarriere.de

Kernmechanik –
Optimiertes Modell:
Kernspin + Dipolmomente
www.kernmechanik.de

Schwebestative
für Profis und Amateure
Handgeführte und körpergestützte Systeme
STEADYDRIVE Balance Systems Ltd.
www.steadydrive.com

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: s.foerster@vhb.de

MATERIALFORSCHUNG

Superabsorber für Öl

Kunststoffe, die begierig Wasser aufsaugen, halten heute unter anderem Babypopos trocken. Nun haben japanische Chemiker gezeigt, dass auch Superabsorber für organische Flüssigkeiten möglich sind. Speziell im Umweltschutz dürften sie unschätzbare Dienste leisten.

Von Lars Fischer

Dass frischgebackene Eltern heute ein leichteres Leben haben als ihre Mütter und Väter, verdanken sie unter anderem so genannten Superabsorbern: Kunststoffen, die ein Mehrhundertfaches ihres Eigengewichts an Wasser aufnehmen können. Als Bestandteil von Windeln fangen sie den Urin auf und halten die Haut des Säuglings trocken. Ähnlich fungieren sie in Damenbinden. Aber auch auf vielen anderen Gebieten hat sich das extrem saugfähige Material bewährt. Zum Beispiel schützt es elektrische Bauteile im Kanaltunnel zwischen Dover und Calais vor Wasserschäden.

Wenn Superabsorber Wasser aufsaugen, werden sie zu flexiblen, aber stabilen Materialien, die fast ausschließlich aus Flüssigkeit bestehen. Solche so genannten Hydrogele sind deshalb auf einzigartige Weise gewebekompatibel und kommen in großem Umfang in Kosmetika und in der Medizin zum Einsatz.

In den letzten Jahren haben Chemiker auch Varianten hergestellt, die schrumpfen oder quellen und damit mechanische Arbeit verrichten, wenn sich pH-Wert, Temperatur oder elektrische Spannung ändern (Spektrum der Wissenschaft 6/2005, S. 48). Diese »smart gels« werden inzwischen bereits kommerziell genutzt, zum Beispiel in temperaturgesteuerten Ventilen für Mikrofluid-Systeme.

Bisher gab es Superabsorber nur für Wasser. Das könnte sich nun ändern. Ein Wissenschaftlerteam um den Chemiker Kazuki Sada von der Universität Kiuschu in Fukuoka (Japan) hat jetzt einen Kunststoff entwickelt, der bis zum Fünfhundertfachen seines Eigengewichts an organischen Lösungsmitteln wie Toluol oder Chloroform aufnehmen kann. Superabsorber für organische Flüssigkeiten scheinen damit möglich. Auch für sie gäbe es eine Unzahl von Einsatzmöglichkeiten. Sie wären insbesondere ein Segen für den Umweltschutz – man denke nur an Ölverschmutzungen auf dem Meer wie an Land.

Ursache der enormen Saugkraft

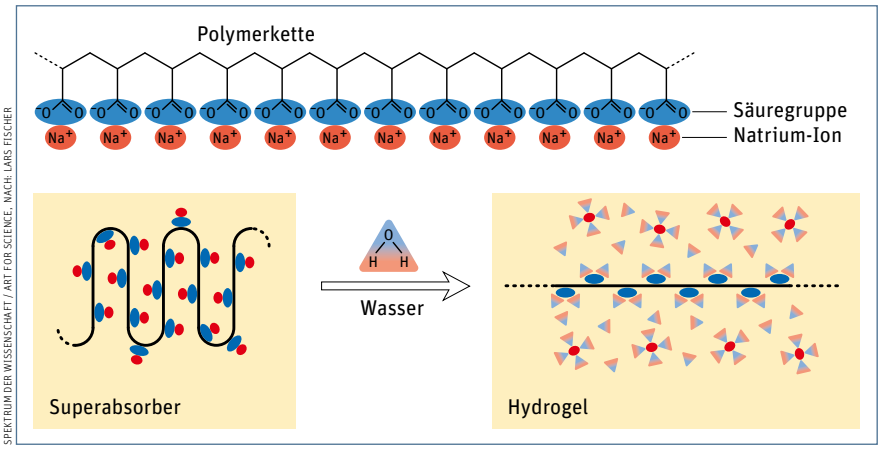
Dass extrem saugfähige Materialien bisher nur für Wasser existierten, liegt am besonderen Aufbau und der Funktionsweise der Superabsorber. Es handelt sich um so genannte Polyelektrolyte; das bedeutet, dass in ihre Struktur viele Ladungsträger eingebaut sind. Als einfachste technische Vertreter können Polyacrylate gelten, die durch Polymerisation von Acrylsäure und Austausch der Protonen in den Säuregruppen gegen Natrium-Ionen hergestellt werden.

Diese positiven Ionen sind im trockenen Zustand durch elektrostatische Kräfte eng an die negativen Säuregruppen des Polymers gebunden, sodass sich die Ladungen ausgleichen. Unter diesen Umständen liegen die Polymerketten in verknäuelter Form dicht gedrängt vor. Doch das ändert sich beim Zutritt von Wasser.

Wassermoleküle sind polar: Sie haben eine positiv und eine negativ geladene Seite. Deshalb können sie gut mit den Ionen des Materials wechselwirken, sich zwischen sie schieben und sie voneinander trennen. Dadurch werden die negativen Ladungen im Polymer nicht mehr durch benachbarte positive Natrium-Ionen ausgeglichen. Sie stoßen sich deshalb gegenseitig ab und die vorher gewundenen Polymerketten strecken sich: Das Material dehnt sich aus.

Hinzu kommt, dass sich die geladenen Teilchen im Polymer genau wie ein gelöstes Salz innerhalb einer semipermeablen Membran verhalten: Sie erzeugen einen osmotischen Druck, der das Wasser nicht nur zwingt, in den Superabsorber zu fließen, sondern es auch dort festhält.

Leider ist das Prinzip auf organische Flüssigkeiten nicht ohne Weiteres übertragbar, weil diese in der Regel unpolar und lipophil (»fettliebend«) sind. Wassermoleküle können einem Ladungsträger ihre jeweils entgegengesetzt geladene Seite zuwenden. Da die resultierende Wechselwirkung auf der elektrostatischen Kraft beruht, ist sie stark genug, um mit der gleichfalls elektrostatischen Anziehung zwischen den Ionen zu konkurrieren. Unpolare Moleküle ziehen einander dagegen nur über die viel schwächeren Van-der-Waals-Kräfte an.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE, NACH: LARS FISCHER

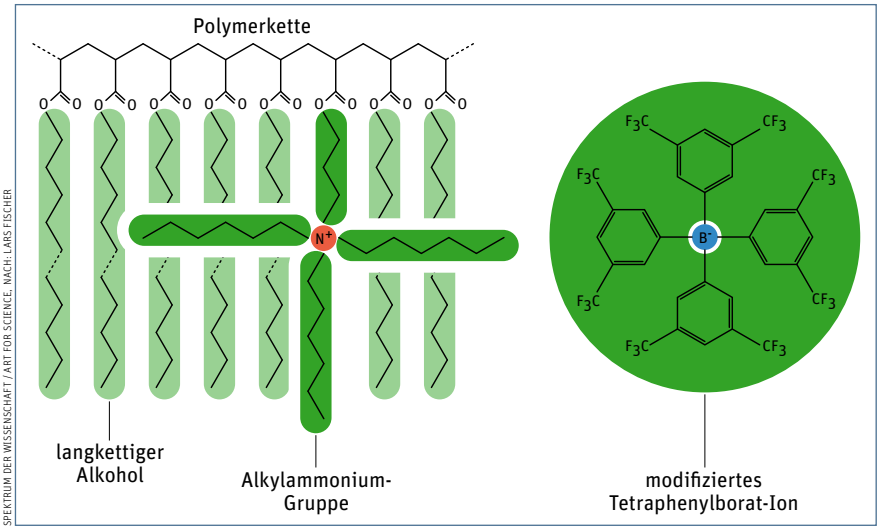
Der herkömmliche Superabsorber Polyacrylat besteht aus elektrisch geladenen Molekülketten, die sich trotzdem verknäueln können, weil positive (rot) Natrium-Ionen ihre negativen (blau) Säuregruppen abschirmen. Bei Zutritt von polaren Wassermolekülen werden diese Ionen jedoch abgedrängt, sodass sich die Stränge wegen der nun wirksamen Abstoßung zwischen den Säuregruppen strecken und zu einem Hydrogel quellen.

Unsere Antwort: Siemens Generation21.

Mit unserem Bildungsprogramm fördern wir die naturwissenschaftliche und technische Ausbildung junger Menschen. Ihnen heute Wissen zu vermitteln heißt, sie fit für ihren beruflichen Weg zu machen. Denn ihre Zukunft ist unsere Zukunft.

www.siemens.de/generation21

SIEMENS



Bei dem neuen Superabsorber für unpolare Flüssigkeiten sind die geladenen Gruppen am Polymer und die freien Ionen mit großen lipophilen (grün) Resten umhüllt. Das schwächt die gegenseitige elektrostatische Anziehung. Zudem sind die meisten Säuregruppen mit einem langkettigen Alkohol verestert und somit ungeladen. Dadurch schaffen es nun auch unpolare Lösungsmittel, die freien Ionen vom Polymer zu verdrängen, sodass dieses sich streckt und aufquillt.

Deshalb können organische Flüssigkeiten nur Materialien lösen, deren Komponenten nicht sehr fest aneinander gebunden sind.

Ein lipophiler Superabsorber hat also zwei sich widersprechende Anforderungen zu erfüllen: Einerseits muss er freie Ionen enthalten, welche die geladenen Gruppen der Polymerketten im trockenen, verknäulten Zustand zusammenhalten, andererseits aber dürfen die elektrostatischen Wechselwirkungen im Material nur sehr schwach sein.

Raffiniertes Molekülkonstrukt

Der von Kazuki Sada und seinen Kollegen entwickelte Polyelektrolyt zeigt, dass dieser Balanceakt möglich ist. Die Grundidee liegt nahe. Man versieht die freien Ionen ebenso wie die geladenen Gruppen auf den Polymerketten mit großen unpolaren Anhängseln. Das hält sie zum einen auf Abstand und verringert so die gegenseitige elektrostatische Anziehung. Zum anderen bietet die große unpolare Oberfläche der Ionen und geladenen Gruppen viel Platz für Van-der-Waals-Wechselwirkungen mit den unpolaren Molekülen einer zugefügten lipophilen Flüssigkeit. Diese Wechselwirkungen werden dadurch so stark, dass sie die konkurrierende elektrostatische Anziehung übertreffen.

Obwohl die Idee einfach klingt, ist ihre Umsetzung in die Praxis knifflig. Die japanischen Forscher mussten dazu die Ladungsverhältnisse in dem erwähnten herkömmlichen Polyacrylat-Superabsorber umkehren: Die Polymerketten enthalten nun positive statt negativer Gruppen; dafür sind die freien Ionen negativ geladen. Als solche wählten Sada und seine Kollegen Borid-Moleküle, in denen vier modifizierte Benzolringe an ein negatives Boratom gebunden sind und es wie Stacheln sternförmig umgeben.

Die Rolle der positiven Gegenspieler auf den Polymerketten übernehmen Alkylammonium-Gruppen: Stickstoffatome mit vier angehängten Kohlenwasserstoffresten. Einer dieser vier »Arme« ist mit seinem Ende an der Säuregruppe des Polyacrylats befestigt. Um die elektrostatischen Kräfte weiter zu minimieren, enthält das Polymer außerdem relativ wenige dieser positiven Ammoniumgruppen; nur jeder 20. Säurerest ist damit bestückt, während die anderen 19 einen neutralen, langkettigen Alkohol tragen.

Durch Versuche mit organischen Lösungsmitteln wie Chloroform demonstrierten die Japaner, dass ihre raffinierte molekulare Konstruktion tatsächlich wie beabsichtigt funktioniert. Damit existiert nun der Prototyp eines Superabsorbers für apolare Flüssigkeiten. Er selbst ist zwar wegen der kompliziert herzustellenden Borid-Ionen kaum zur Massenproduktion geeignet und damit nicht kommerziell einsetzbar. Doch dieses Hindernis scheint überwindbar.

Generell lässt sich die Bedeutung der neuen Stoffklasse kaum hoch genug veranschlagen. In unserer hochtechnisierten Welt besteht ein erheblicher Bedarf an solchen Materialien. Viele unpolare Flüssigkeiten sind giftig und gefährden die Umwelt, man denke nur an Benzin oder Motoröl. Allein durch Tropfverluste an Tankstellen gelangen in Deutschland jährlich mehr als fünf Millionen Liter Kraftstoffe in die Umwelt. Aus Motoren heraussickerndes Öl belastet die Böden in der Nähe von Straßen. Durch Tankerunglücke auf den Meeren kommt es immer wieder zu einer verheerenden Ölpest.

Die Industrie verwendet große Mengen organischer Flüssigkeiten als Lösungsmittel in der Produktion oder als Bestandteil von Erzeugnissen wie Lacken und Farben. Diese Chemikalien gefährden selbst in geringen Mengen das Grundwasser. Auch bilden kleine Leckagen und Handhabungsverluste eine nicht zu vernachlässigende Verschmutzungsquelle. So gering sie im Einzelnen sein mögen, summieren sie sich doch zu einem großen Umweltproblem.

Unpolare Superabsorber böten für all diese Fälle eine einfache Lösung. Sie könnten nicht nur nachträglich zum Entfernen von Verschmutzungen dienen, sondern bei geeignetem Einsatz auch verhindern, dass giftige Flüssigkeiten durch kleine Lecks überhaupt in die Umwelt entweichen.

Über diese naheliegende Anwendung hinaus sehen die japanischen Forscher weitere Einsatzmöglichkeiten für die neue Variante von Polyelektrolyten. Die daraus gebildeten Gele könnten etwa kontinuierlich Schmierstoffe in Lager und Gelenke abgeben oder als Bestandteil völlig neuartiger Materialien dienen. Denkbar wären auch Ventile analog zu denen aus Hydrogelen für den Umgang mit Chemikalien, die mit Wasser heftig reagieren. Das Potenzial der unpolaren Superabsorber ist also groß und man braucht wohl kein Prophet zu sein, um vorherzusagen, dass sie wie die Trockenwindeln sicher schon bald Eingang in unseren Alltag finden werden.

Lars Fischer ist Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist im Hamburg.

Springers Einwürfe

Die Zukunft bringt's nicht

Beim Ausmalen künftiger Erlebnisse täuschen wir uns systematisch.

Der Mensch ist das Tier, das Pläne macht. Er spielt im Geist eine mögliche Zukunft durch und fragt sich zum Beispiel: Wie wäre es, wieder einmal ins Kino zu gehen? Das Gehirn produziert bereitwillig entsprechende Bilder und Gefühle: Ich habe einen bequemen Sitzplatz mit guter Sicht, es wird dunkel, das angeregte Geplauder rundum erstirbt, erwartungsvoll sehe ich den Vorhang aufgehen und freue mich auf zwei knappe Stunden voll fremder Emotionen. – Ich sollte ins Kino gehen!

Wie zuverlässig sind solche gedanklichen Vorwegnahmen kommender Ereignisse? Die US-Psychologen Daniel T. Gilbert und Timothy D. Wilson haben in Experimenten nun vier typische Streiche ausgemacht, die uns Zukunftsvorstellungen spielen *(Science, Bd. 317, S. 1351)*.

Erstens neigen Versuchspersonen dazu, für das Ausmalen künftiger Erlebnisse nicht durchschnittliche, sondern extreme Erfahrungen heranzuziehen. Ich denke beim Planen eines Kinobesuchs eben nicht an die unzähligen mittelmäßigen Streifen, die ich schon gesehen habe, sondern an besondere Highlights.

Zweitens lässt man bei Zukunftsplänen gern das Unwesentliche weg – und färbt dadurch das Bild allzu rosig. Beim Gedanken an den Kinobesuch unterschlage ich die Parkplatzsuche, das Anstellen an der Kasse, den Riesen direkt vor mir, die redselige Gruppe hinten und so weiter.

Drittens wird die simulierte Zukunft zeitlich gestaucht. In meinem imaginierten Kinoerlebnis dominiert der spannende Filmbeginn; hingegen fühle ich nicht im Vorhinein, wie mich während klischeehaft ausgewalzter Szenen das Sitzfleisch schmerzen wird. Auch beim imaginierten Lottogewinn spüren wir nur die erste Freude über den plötzlichen Geldsegen, nicht den Alltagstrott, der jeden wirklichen Gewinner unweigerlich einholt. Das Gleiche gilt für schlimme Schicksalsschläge: Stellen wir uns eine schwere Krankheit vor, erleben wir im Geist nur den Schock der Frühphase, ohne zu berücksichtigen, wie sich chronisch Kranke mit ihrem Leiden arrangieren.

Besonders tückisch ist die vierte Deformation unserer Zukunftserwartung, fachchinesisch Dekontextualisierung genannt. In Tests unterschätzen Probanden gern, wie stark ihr gegenwärtiger Zustand die ausgemalte Zukunft färbt. Wer gerade niesend unterm Regenschirm friert, freut sich weniger auf den kommenden Skiurlaub als jemand, dem eine freundliche Wintersonne lacht. Ein Hungriger erlebt die Vorstellung, sich demnächst einmal so richtig den Bauch vollzuschlagen, viel genussvoller als ein Satter. Wenn ich vom Joggen komme, erscheint mir die bloße Aussicht auf einen Schluck Wasser als das höchste der Gefühle, während mich der Gedanke an Wassertrinken normalerweise kaltlässt.

Aus den komplexen Befunden der Psychologen ziehe ich eine einfache Lehre. Es lohnt sich, hinsichtlich der Zukunft eine – salopp gesagt – philosophische oder besser stoische Haltung einzunehmen. Künftiges Glück wird mich weniger freuen, als ich heute erhoffe, künftiges Leid mich dafür aber auch weniger schmerzen als befürchtet. Ich werde weiterhin gern ins Kino gehen, doch nicht jedes Mal ein Erlebnis erwarten, das mich so umwirft wie seinerzeit »Außer Atem« von Jean-Luc Godard oder »Das Schweigen« von Ingmar Bergman.

Michael Springer

Lassen sich diese individualpsychologischen Erkenntnisse auf gesellschaftliche Zukunftserwartungen übertragen? Wenn ja, hieße das: Wir sollen gegenüber Horrorszenarien kühlen Kopf bewahren und Utopien mit gesundem Misstrauen begegnen.

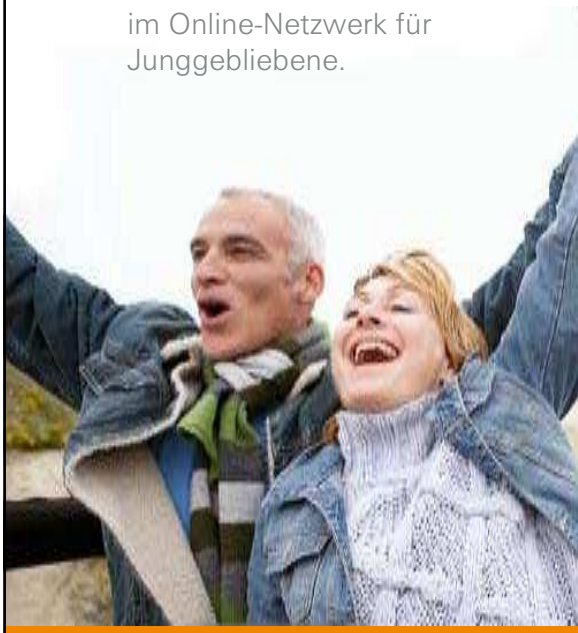
Noch eine Kleinigkeit habe ich aus den Fehlern der Zukunftssimulation gelernt: Mit leerem Bauch geht man besser nicht einkaufen, weil dann die Augen größer sind als der Magen.

Das Netzwerk für die Generation der Junggebliebenen

Knüpfen Sie Kontakte zu Menschen Ihrer Wellenlänge.

Tauschen Sie Wissen, Erfahrungen und Meinungen.

Einfach und kostenlos im Online-Netzwerk für Junggebliebene.



Jetzt mitmachen!

www.platinnetz.de

Platinnetz
Verbindungen leben.

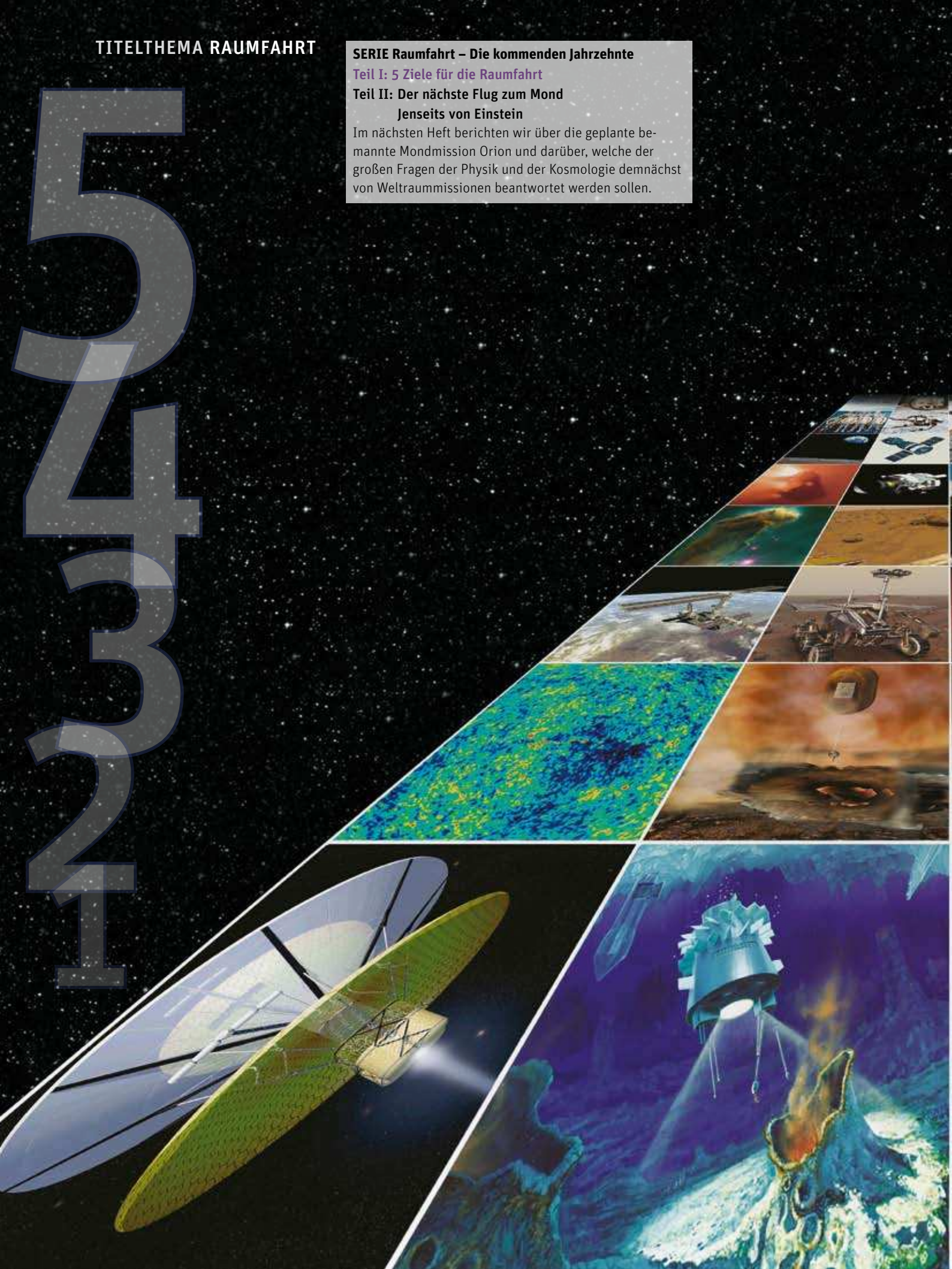
SERIE Raumfahrt – Die kommenden Jahrzehnte

Teil I: 5 Ziele für die Raumfahrt

Teil II: Der nächste Flug zum Mond

Jenseits von Einstein

Im nächsten Heft berichten wir über die geplante bemannte Mondmission Orion und darüber, welche der großen Fragen der Physik und der Kosmologie demnächst von Weltraummissionen beantwortet werden sollen.

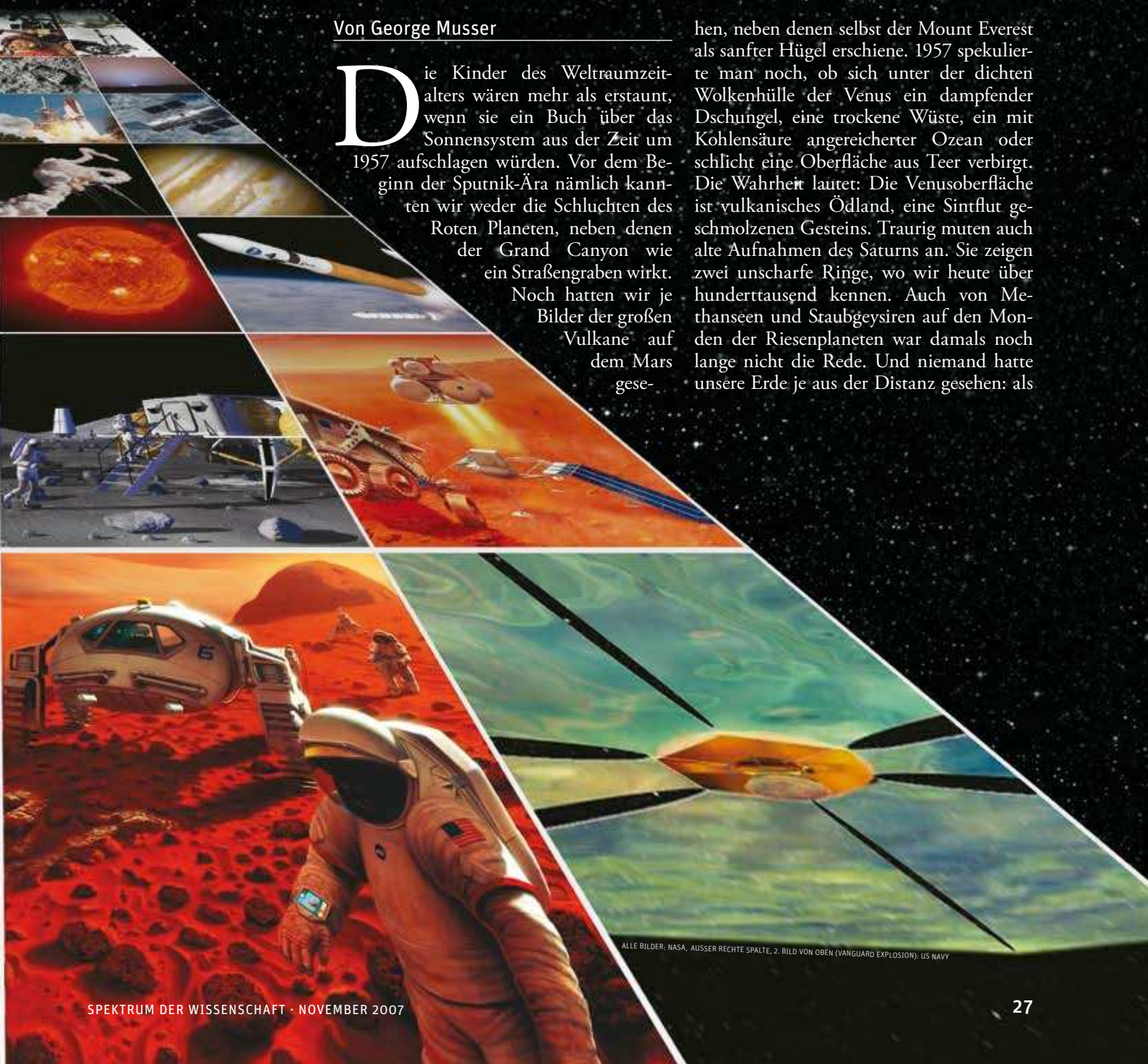


5 ZIELE FÜR DIE RAUMFAHRT

Was die Erforscher des Sonnensystems wissen wollen und wie die Raumfahrtorganisationen dafür sorgen sollten, dass sie es erfahren

Von George Musser

Die Kinder des Weltraumzeitalters wären mehr als erstaunt, wenn sie ein Buch über das Sonnensystem aus der Zeit um 1957 aufschlagen würden. Vor dem Beginn der Sputnik-Ära nämlich kannten wir weder die Schluchten des Roten Planeten, neben denen der Grand Canyon wie ein Straßengraben wirkt. Noch hatten wir je Bilder der großen Vulkane auf dem Mars gesehen, neben denen selbst der Mount Everest als sanfter Hügel erschiene. 1957 spekulierte man noch, ob sich unter der dichten Wolkenhülle der Venus ein dampfender Dschungel, eine trockene Wüste, ein mit Kohlensäure angereicherter Ozean oder schlicht eine Oberfläche aus Teer verbirgt. Die Wahrheit lautet: Die Venusoberfläche ist vulkanisches Ödland, eine Sintflut geschmolzenen Gesteins. Traurig muten auch alte Aufnahmen des Saturns an. Sie zeigen zwei unscharfe Ringe, wo wir heute über hunderttausend kennen. Auch von Methanseen und Staubgeysiren auf den Monden der Riesenplaneten war damals noch lange nicht die Rede. Und niemand hatte unsere Erde je aus der Distanz gesehen: als



ALLE BILDER: NASA, AUSSER RECHTE SPALTE, 2. BILD VON OBEN (VANGUARD EXPLOSION): US NAVY

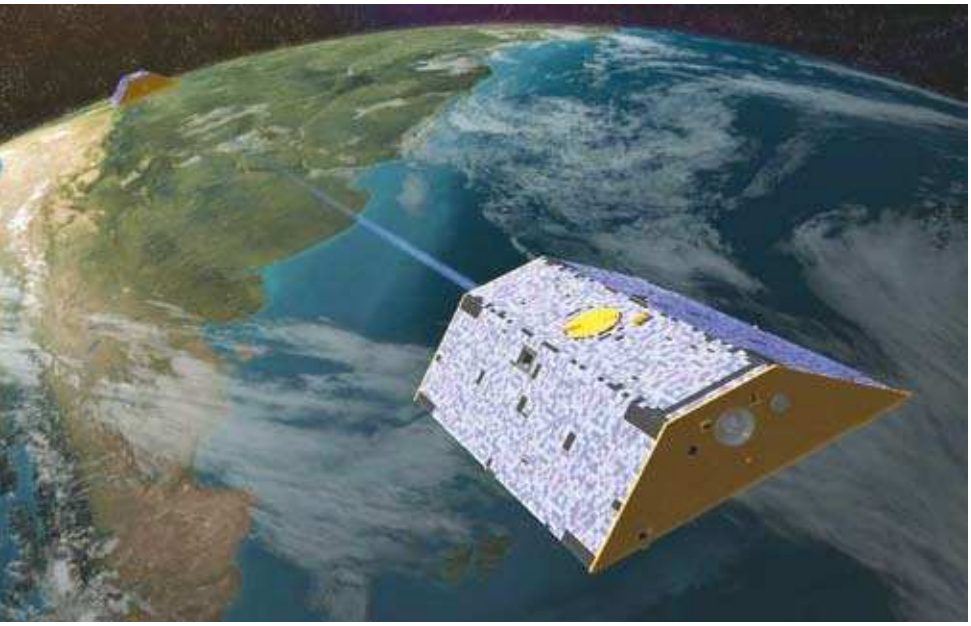


ILLUSTRATION: NASA, JPL

Das durch Mikrowellenfunk verbundene Satellitenduo Grace misst Veränderungen der Gravitation, die durch Wasserbewegungen verursacht werden. Seit 2002 ist es im Orbit und hat seine auf fünf Jahre ausgelegte nominelle Lebensdauer bereits überschritten. Entwickelt wurde es von der Nasa gemeinsam mit dem DLR.

blaue Murmel auf schwarzem Samt, umgeben nur von einer hauchdünnen, verletzlichen Schicht aus Wasser und Luft.

Dieses Wissen hat uns verändert. Dank einer neuen Perspektive auf die Erde verstehen wir besser, wie sehr der Mensch seine Umwelt beeinflusst. Jüngste Entdeckungen im Sonnensystem treiben uns an, immer mehr über unsere Nachbarwelten im All in Erfahrung zu bringen. Sogar neue Gefahren tauchen aus dem All auf: Die schiere Möglichkeit, dass Asteroiden auf unseren Planeten treffen könnten, ist heute Grund genug, uns mit Abwehrmaßnahmen zu beschäftigen.

Zuständig für das Abarbeiten des Aufgabenkatalogs ebenso wie für die Visionen sind vor allem die großen Weltraumorganisationen. Allen voran die US-Raumfahrtbehörde Nasa, die mit einem Jahresbudget von derzeit 16,8 Milliarden Dollar ausgestattet ist. Bis zu 60 Prozent davon fließen allerdings in die wissenschaftlich eher unergiebige bemannte Raumfahrt. Allein der bis 2020 anstehende bemannte Flug zum Mond soll bis zu 100 Milliarden Dollar verschlingen. Das Jahresbudget der Europäischen Weltraumorganisation Esa hingegen erreicht 2007 bescheidene 3 Milliarden Euro. Hightech soll die Europäer trotzdem auf Augenhöhe mit den USA bringen. Ebenfalls mit im Spiel sind Russland, China, Japan und Indien. Immer öfter wird auch gemeinsame Sache gemacht. Drohen Missionen an den Finanzen zu scheitern, werden Eitelkeiten zumeist hintangestellt.

Am schwersten hat es derzeit die Nasa. »Sie ringt um ihre Identität«, sagt Anthony Janetos vom Pacific Northwest National Laboratory. Janetos gehört einem Ausschuss des amerikanischen Wissenschaftsrats (*National Research Council*, NRC) an, der das Erdbeobachtungsprogramm der Nasa überwacht. Denn die Behörde kann nicht alles gleichzeitig leisten, was von ihr verlangt wird: bemannte Raumfahrt, Erforschung des Sonnensystems und des Kosmos, Erdbeobachtung und Umweltschutz.

US-Präsident George W. Bush hatte ihr zwar 2004 ein klares Ziel gesetzt: Fuß zu fassen auf Mond und Mars. Um die Finanzierung zu stemmen, riss die Nasa mittlerweile aber sogar die Brandmauer ein, die zwei ihrer Aufgaben – das Wissenschaftsprogramm und die bemannte Raumfahrt – bislang vor Kostenexplosionen des jeweils anderen geschützt hat. Trotzdem: Die Raumfahrtbehörde hat weiterhin schlicht »nicht genug Geld, um alles zu tun, wozu sie aufgefordert ist«, so Nasa-Stratege Bill Claybaugh.

Die Zukunft der Nasa-Raumfahrt

1957 startete überraschend der sowjetische Sputnik – die USA waren nur die Nummer 2 im All. Auch heute steht die Raumfahrt der Nasa wieder vor dramatischen Entwicklungen.

Der Start von Sputnik im Oktober vor 50 Jahren hat Spuren hinterlassen. Schließlich hatten sich die Vereinigten Staaten damals schon als erste Nation gesehen, die eine Raumsonde ins All befördern könne. Doch anders als etwa der Mord an John F. Kennedy oder die Attentate vom 11. September 2001, die sich tief ins kollektive Gedächtnis Amerikas eingebrannt haben, war der Start des sowjetischen Satelliten weit weniger einschneidend.

Natürlich: Wer möchte schon, dass plötzlich ein kleiner leuchtender Ball hoch über das eigene Land fliegt – gesteuert von einem Gegner, der im Kalten Krieg auch mit nuklearen Waffen drohen konnte –, ohne dass sich dagegen etwas unternehmen ließe? Trotzdem verbanden sich mit dem Aufbruch ins Raumfahrtalter – egal, wer ihn als Erster unternahm – vielerlei Hoffnungen. Die Menschheit erhebt sich endlich aus ihrer Wiege, jubelten Visionäre. Bald würde sie den Sternen zustreben. Pragmatiker hofften auf Kommunikations- und Wettersatelliten. Selbst heute noch entfaltet der Lichtpunkt, der vor einem halben Jahrhundert am Abendhimmel vorüberzog, seine Wirkung: Nicht wenige Wissenschaftler und Ingenieure führen ihre Leidenschaft für den Weltraum auf genau jenes Ereignis zurück. »Jahrtausendelang schon blickt die Menschheit zu den Sternen, doch niemals bot der Himmel ein solch überwältigendes Schauspiel wie im Jahr 1957«, schrieben die Astronomen Fred Whipple und J. Allen Hynek damals.

Auch heute, fünfzig Jahre später, stehen dem US-Weltraumprogramm wieder aufregende Zeiten bevor. Schon in zehn Jahren wird es kaum wiederzuerkennen sein. Der Spaceshuttle – trotz all seiner Schwächen das raffinierteste jemals entwickelte Fluggerät – wird der Vergangenheit angehören. Zunehmend bündelt die US-

Doch auch andere Raumfahrtnationen lassen Projekte aus Kostengründen in der Schublade verschwinden. Welche der vielen Vorhaben aber sind tatsächlich wünschenswert? Was kann und sollte man sich von den Programmen der Planetenforschung in aller Welt erhoffen? Fragen wie diese legen sich die Ausschüsse des NRC regelmäßig vor. Fünf Prioritäten haben sie identifiziert und geben damit einen langen Weg vor – hier zeigen wir, welcher Teil der Strecke noch vor Nasa, Esa & Co. liegt.

1 Überwachung des irdischen Klimas

Rover, die über den Mars rollen, oder erste Blicke unter den Dunstschleier von Titan sind aufregender als das mühselige Geschäft der Erdbeobachtung. Nicht allzu verwunderlich also, dass das wichtige Thema von der Nasa und der US-Behörde für Ozeane und Atmosphäre, NOAA, vernachlässigt wurde. Schon 2005 hatte der entsprechende NRC-Ausschuss zwar auf das »vom Kollaps bedrohte« System von US-Umweltsatelliten hingewiesen. Dennoch leitete die Nasa binnen fünf Jahren 600 Millionen Dollar aus den Erdbeobachtungsbudgets in Kassen für die Raumfähren und die Raumstation ISS um.

Das hat Folgen. Weil das »National Polar-Orbiting Operational Environment Satellite System« (NPOESS) sein Budget überschritt, wurden nun Instrumente gestrichen, die klimarelevante Daten hätten messen sollen. Kritisch ist auch die Situation der zwei Dutzend Eos-Satelliten: Das »Earth Observation System« wird das Ende seiner erwarteten Lebensdauer erreichen, bevor Ersatz bereitsteht.

JESSE ALLEN, EARTH OBSERVATORY / NASA / USGS EROS DATA CENTER

Feuer in Alaska und im kanadischen Yukon-Territorium im Jahr 2004. Aufgenommen wurde dieses Bild in verschiedenen Wellenlängen von Landsat 7. Seit im Jahr 2003 der Scan Line Corrector des US-Satelliten ausfiel, der dessen Vorwärtsbewegung kompensiert, liefert Landsat 7 Daten geringerer Qualität. Ersatz gibt es nicht, denn schon seit über einem Jahrzehnt kämpft das Landsat-Programm mit Budgetproblemen.

»Wir dürfen nicht warten, bis alles auseinanderfällt«, sagt Robert Cahalan, Leiter des Bereichs Klima am Goddard Space Flight Center, dem größten der Nasa-Raumflugzentren. Denn der Schaden wäre nicht wiedergutzumachen. Wer komplexe Trends in der Atmosphäre ermitteln will, scheitert leicht an Datenlücken. Außerdem werden die Daten unzuverlässig. Wenn etwa ein neues Instrument eine hellere Sonne zu sehen glaubt als noch sein Vorgänger: Liegt dann tatsächlich ein (sonnen-)physikalisches Phänomen vor oder ist einfach nur eines der Instrumente schlecht kalibriert? Ohne zeitlich überlappende Messreihen lässt sich diese Frage kaum eindeutig beantworten.

Kleine Lücken gibt es bereits. Dem Landsat-System, das die Erdoberfläche seit 1972

Raumfahrtbehörde Nasa ihre Aktivitäten im Constellation-Programm, das Astronauten zu Mond und Mars bringen soll. Kein schlichter Pendelverkehr zwischen Erde und Internationaler Raumstation mehr, sondern die Errichtung einer Basisstation auf dem Mond, der Besuch eines Asteroiden und schließlich die Gründung menschlicher Siedlungen auf dem Mars sind die hochgesteckten Ziele. Seinen langsamen, aber stetigen Kurs hofft Nasa-Chef Michael Griffin auch bei begrenzten Budgets nicht verlassen zu müssen – bis 2020 sollen wieder Menschen auf dem Mond landen.

Umwälzungen versprechen die kommenden Jahrzehnte auch in der Planetenforschung. Die Pionierjahre, in denen man sich einen ersten Überblick über das Sonnensystem verschaffte, sind vorbei. Mittlerweile sind die Weltraumorganisationen auf – manchmal im Wortsinn – tiefer schürfende Untersuchungen aus. Noch unbeantwortet ist schließlich auch die wohl wichtigste Frage, ob es in Reichweite unserer Raumsonden Leben gibt oder zumindest gegeben hat. Manche Monde etwa von Jupiter und Saturn könnten dem Leben recht freundlich gesinnt sein.

2057 schließlich werden die Zeiten noch einmal andere sein. Die strikte Trennlinie zwischen bemannter Raumfahrt und Robotermissionen dürfte sich bis dahin längst verwischt haben. Schließlich stoßen automatisierte Missionen schon jetzt an Grenzen, die nur Astronauten werden überschreiten können. Derzeit allerdings tut erst einmal Stabilität not. Die Schwankungen, die das Nasa-Budget in den letzten Jahren erlebte, haben ebenso wie wechselnde Strategien, die die gesamte Behörde betrafen, manches Projekt in die Sackgasse geführt und manche Anstrengung fruchtlos bleiben lassen. Darum ist nichts wichtiger, als die Prioritäten für die nächsten Jahrzehnte klar im Auge zu behalten.

Steven Ashley und George Musser
Die Autoren sind Redakteure bei Scientific American.

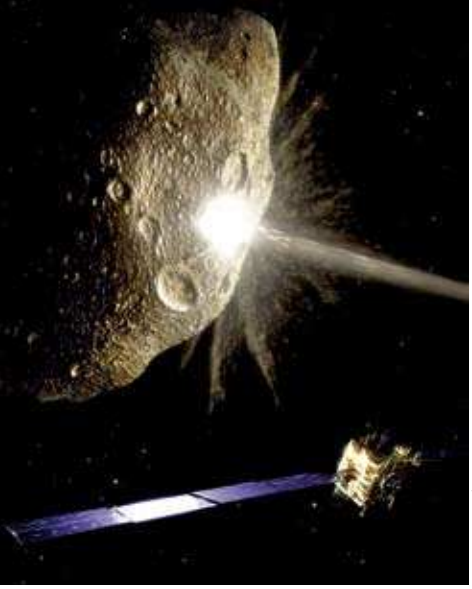


ILLUSTRATION: ESA / AOES MEDIALAB

Im Rahmen der Don-Quijote-Mission könnte der Orbiter Sancho (rechts) die Folgen des Einschlags von Hidalgo auf einen Asteroiden beobachten.

überwacht, droht seit Jahren das endgültige Aus. Mittlerweile fehlen manche Daten, ohne dass es Ersatz gibt. Indische Satellitenbetreiber mussten schon mit Daten über die Getreideproduktion aushelfen. Der NRC-Ausschuss forderte daher, das Erdbeobachtungsbudget wieder auf das alte Niveau anzuheben. Dann könnte man im kommenden Jahrzehnt 17 neue Missionen finanzieren, die etwa die polaren Eisschilde und den Kohlendioxidanteil in der Atmosphäre überwachen würden.

Erfreulicher ist die Situation bei der Esa. »In Sachen Erdbeobachtung gibt Europa zurzeit das Tempo vor«, sagt Mark Drinkwater, Chef der Abteilung für *mission science* der Esa-Erdbeobachtungsprogramme. Der Brite kennt auch die andere Seite: 13 Jahre lang arbeitete er für die Nasa. Viel unmittelbarer als die Esa sei die US-Behörde Regierungsinteressen, Legislaturperioden und Budgetveränderungen unterworfen. Die europäische Weltraumorganisation hingegen, in der 17 Mitgliedsstaaten ihre Bemühungen vereinen, sei so gut in Schwung, »dass neue Missionen häufiger und regelmäßiger beschlossen werden«.

437 Millionen Euro fließen 2007 in die Erdbeobachtung. Selbst das ist vergleichsweise wenig: »Wir haben derzeit eine Delle in der finanziellen Entwicklung. Manche Projekte sind abgeschlossen, andere noch nicht angelaufen«, sagt Rainer Krutsch, Chef-Controller des Esa-Bereichs für Erdbeobachtung. Vor einigen Jahren lag das Budget bei 600 bis 700 Millionen Euro, »spätestens in zehn Jahren sollten wir mindestens 800 oder 900 Millionen Euro erreichen«. Zum Vergleich: Heute ist die Raketenentwicklung mit 627 Millionen Euro der größte Posten im Esa-Budget – bei stabiler, eher rückläufiger Tendenz.

Das Living-Planet-Programm der Esa umfasst zum einen die Earth-Explorer-Missionen. Sechs Satelliten werden bis 2013 abheben, die Finanzierung ist schon gesichert. Goce etwa wird das Erdschwerefeld messen und Auskunft über Meeresströmungen, Meeresspiegelhöhe und Polareismengen geben. Das Swarm-Trio wird sich dem Erdmagnetfeld widmen und neben Informationen über das Erdinnere auch klimarelevante Ergebnisse liefern. ADM-Aeolus schließlich soll messen, wie sich die Eigenschaften von Wind und Wolken in vertikaler Richtung verändern.

Weitere Satelliten werden bald im Rahmen von GMES ins All gebracht. Die »globale Umwelt- und Sicherheitsüberwachung« von Europäischer Union und Esa gilt wie auch das satellitengestützte Navigationssystem Galileo als Esa-»Leuchtturmprojekt«. Während die Esa für GMES mindestens fünf Sentinels (»Wächter«) in eine Umlaufbahn schießen wird, ist die EU für die Informationsinfrastruktur zuständig. Behörden, Politikern und anderen Fachleuten wird sie Satellitendaten zu Wirtschaft, Verkehr, Umwelt und Sicherheitspolitik zur Verfügung stellen.

»Sentinel 1A hat den Bewilligungsprozess schon komplett durchlaufen und soll 2011 abheben«, berichtet Mark Drinkwater. Der Radarsatellit wird die Meere beobachten und unter anderem auch unerlaubtes Ablassen von Öl registrieren. Die anderen Umwelt-»Wächter« werden ebenfalls Zusatzaufgaben haben. Informationen über Naturkatastrophen zum Beispiel sind wichtig für den Zivilschutz, auch die Einhaltung internationaler Umweltabkommen werden sie überprüfen. Geld ist genug da: »Rund 2,5 Milliarden Euro werden bis 2023 in die Entwicklung von GMES investiert«, sagt Controller Krutsch. Hinzu kommen künftige Betriebskosten von 80 bis 100 Millionen Euro jährlich. »Der Stellenwert der Erdbeobachtung ist in Europa derzeit höher als in den USA«, bestätigt daher auch Krutsch – zumindest, wenn man von den »gigantischen Budgets« im Militärbereich absehe.

Drei neue MetOp-Satelliten hat die Esa ebenfalls gebaut, als Betreiber fungiert die zwischenstaatliche Organisation Eumetsat. MetOp-A, seit Mai 2007 voll in Betrieb, ist Europas erster meteorologischer Satellit auf einer polaren Umlaufbahn. Er nimmt die Erde aus geringer Höhe unter die Lupe und erlaubt Wettervorhersagen ebenso wie ein verbessertes Verständnis des Klimawandels. Sein Tagespensum ist mit der NOAA abgestimmt: MetOp-A fliegt den »Morgenorbit«, überquert also den Äquator vormittags (Ortszeit), während US-Satelliten die Nachmittagsschicht fliegen werden. Selbst MetOp-B und MetOp-C – Letzterer muss auf seinen Start noch bis 2014 warten – liegen bereits fertig montiert in der Lagerhalle.

2 Abwehr von Asteroiden

Ganz abwegig ist ein Szenario, bei dem ein Asteroid einschlägt, nicht. Die Wahrscheinlichkeit, dass zum Beispiel der 320-Meter-Asteroid Apophis im Jahr 2036 die Erde trifft, liegt bei immerhin 1 : 45 000. Daher ist die Nasa auch ohne offiziellen Auftrag aktiv. Ihr Spaceguard Survey sucht für 4 Millionen Dollar jährlich nach kilometergroßen Objekten im erdnahen Weltraum, die beim Einschlag eine globale Katastrophe auslösen könnten.

Bislang wurden, vor allem von Spaceguard-Astronomen, 900 kilometergroße Himmelskörper identifiziert. Keiner davon stellt in den

In Kürze

- **Fünf wichtige Ziele,** so sagen Forscher, sollten die Raumfahrtorganisationen in den kommenden Jahrzehnten mit unbemannten Missionen verfolgen. Die Stichworte: Erdbeobachtung, Asteroidenabwehr, Suche nach Leben, Erforschung der Planetenentstehung, Überschreiten der Grenzen des Sonnensystems
- **Viele Vorhaben erfordern** neue Technologien, etwa das Beschaffen von Bodenproben vom Mars, ein Heißluftballon für Titan oder die Beeinflussung der Bahn eines Asteroiden. Beschränkte Budgets zwingen allerdings dazu, Prioritäten zu setzen.
- **Die größte Expedition** soll eine interstellare Sonde unternehmen. Sie könnte zunächst den Rand des Sonnensystems untersuchen und anschließend Aufschluss über den interstellaren Raum geben. Dabei würde sie Forschern auch zu kosmologischen Erkenntnissen verhelfen. Ihr endgültiges Reiseziel wäre ein Stern wie Epsilon Eridani.

nächsten Jahrhunderten eine Gefahr dar. Weil die Entdeckungsrate langsam abnimmt, geht man davon aus, dass rund 80 Prozent aller Objekte dieser Größenordnung bereits gefunden wurden. Kleinere Objekte hingegen werden bisher nicht systematisch ins Visier genommen. Doch rund 20 000 Himmelskörper, so schätzen Experten, können der Erde bedrohlich nahe kommen.

Die Nasa würde daher gerne das bodengebundene 8,4-Meter-Teleskop Large Synoptic Survey Telescope in die Suche einbeziehen. 2014 soll es in Chile in Betrieb gehen und könnte dann auch nach 100 bis 1000 Meter großen Himmelskörpern fahnden. In den ersten zehn Jahren ließen sich rund 80 Prozent der gefährlichen Asteroiden aufspüren, mit mehr Geld vielleicht auch 90 Prozent.

Doch bodengebundene Teleskope wie das LSST sind blind für Objekte, die sich nahe der Erde auf deren Umlaufbahn befinden. Gerade solche gefährlichen Asteroiden rücken nur in der Dämmerung in unser Blickfeld, dann aber können sie vom Sonnenlicht überstrahlt werden. Das zweite Problem: Das LSST gewinnt seine Daten vor allem bei optischen Wellenlängen. Größenabschätzungen, die von der Helligkeit auf die Masse eines Himmelskörpers schließen, sind dadurch aber mit einer Ungenauigkeit von etwa einem Faktor 2 behaftet. »Will man es richtig machen, muss man im Infrarotbereich vom Weltraum aus beobachten«, sagt daher Planetenforscher Donald Yeomans vom Jet Propulsion Laboratory in Kalifornien. Die Nasa schlug bereits ein 500 Millionen Dollar teures Weltraumteleskop vor, das die Sonne auf einer Umlaufbahn umkreist.

Für die unmittelbare Zukunft jedoch liegen die Hoffnungen auf Pan-Starss. Das durch besonders leistungsfähige Computer unterstützte US-amerikanische Beobachtungsprojekt basiert auf einem Teleskop mit weitem Gesichtsfeld und vier 1,4-Gigapixel-Digitalkameras. Errichtet wurde es 2006 auf der hawaiianischen Insel Maui. Mit seiner Hilfe wollen Forscher die Orbits von bedrohlichen Himmelskörpern mit über einem Kilometer Durchmesser vermessen. Zudem sollen 99 Prozent aller Objekte mit Durchmessern ab 300 Meter gefunden werden.

In Europa indessen gibt es derzeit keine nennenswerten Suchprogramme, die meisten wurden eingestellt. »Die Hauptlast liegt bei den Amerikanern«, bestätigt auch Gerhard Hahn vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), der auf die Erforschung erdnaher Asteroiden spezialisiert ist. »Dafür aber hat die Esa mit ihrem Don-Quijote-Konzept ein Paradeprojekt vorzuweisen, wenn es um die Abwehr eines drohenden Einschlags geht«, so Hahn.

Im Rahmen der auf 300 bis 400 Millionen Euro geschätzten Don-Quijote-Mission soll ein 400 Kilogramm schweres Projektil auf einen Asteroiden abgefeuert werden. Der Rückstoß der durch den Einschlag herausgeschleuderten Trümmer würde dann dessen Bahn verändern. Das Esa-Komitee Neomap *(Near Earth Object Mission Advisory Panel)* empfahl im Jahr 2004 einen ersten Versuch: »Nur so finden wir heraus, ob unser Plan funktioniert«, erklärt der Neomap-Vorsitzende und DLR-Seniorwissenschaftler Alan Harris. Noch existiert Don Quijote zwar nur als detailliertes Konzept auf Papier, ist aber der ausgereifteste Abwehrplan, der derzeit existiert. »Im Prinzip könnte die Mission binnen fünf Jahren starten«, so der Brite Harris – wenn denn die Finanzierung geklärt ist. Möglicherweise nehmen Europa und Amerika das Projekt sogar gemeinsam in die Hand. »Unsere Strategie des

ABGELENKT

- **Eine Daumenregel** besagt, dass man einen Asteroiden wie Apophis um einen Erdradius von seiner Bahn ablenkt, wenn man seine Geschwindigkeit ein Jahrzehnt vor dem Einschlag um einen Millimeter pro Sekunde verändert.
- »Typischerweise« aber, so DLR-Forscher Harris, müsse man mit einem **kinetischen Impaktor** die Geschwindigkeit von 100- bis 200-Meter-Asteroiden um einige Zentimeter pro Sekunde ändern.
- Solch kleine Einflüsse müssen sich dann während vieler Umläufe des Asteroiden **aufsummieren, um wirksam zu sein**.

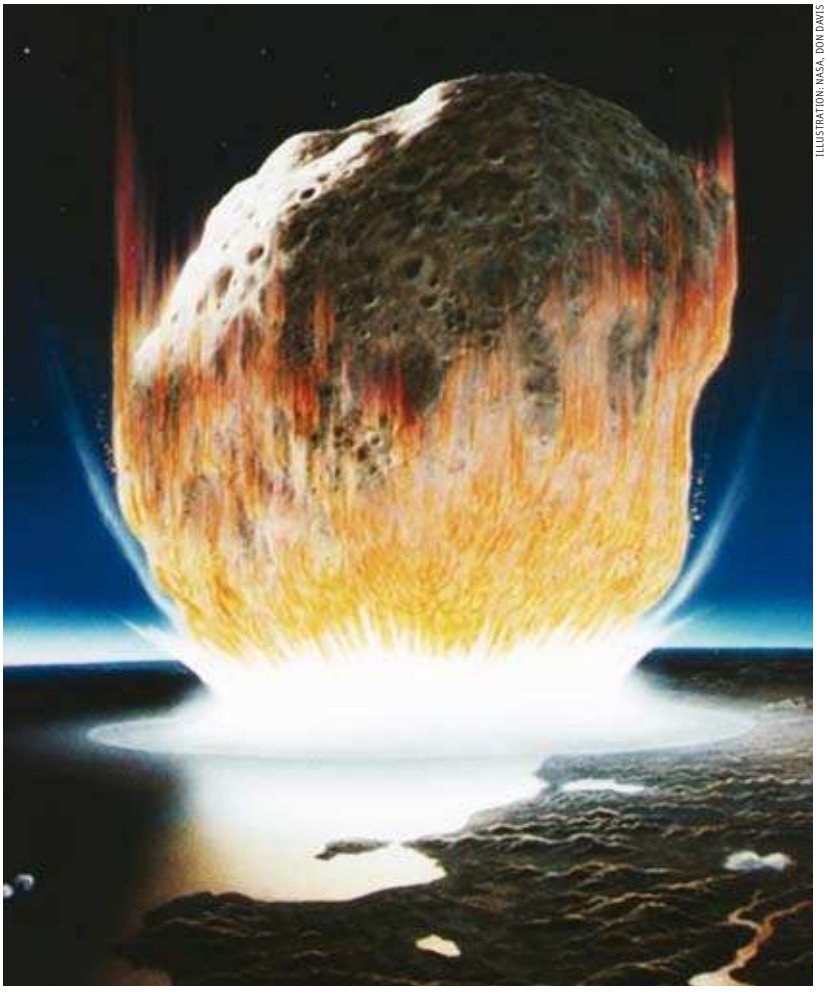


ILLUSTRATION: NASA, DON DAVIS

So sah der Anfang vom Ende der Dinosaurier aus, vermuten viele Forscher. Die heute bekannten kilometergroßen Himmelsbrocken im erdnahen Weltraum stellen allerdings keine Gefahr dar.

ILLUSTRATION: NASA, TIBOR BALINT

Ein Heißluftballon zehn Kilometer über Titan? Eine Hülle mit zwölf Meter Durchmesser und die Abwärme einer Plutoniumbatterie zum Aufheizen der Titan-»Luft« wären die Voraussetzungen dafür, dass er 160 Kilogramm an Instrumenten tragen könnte.

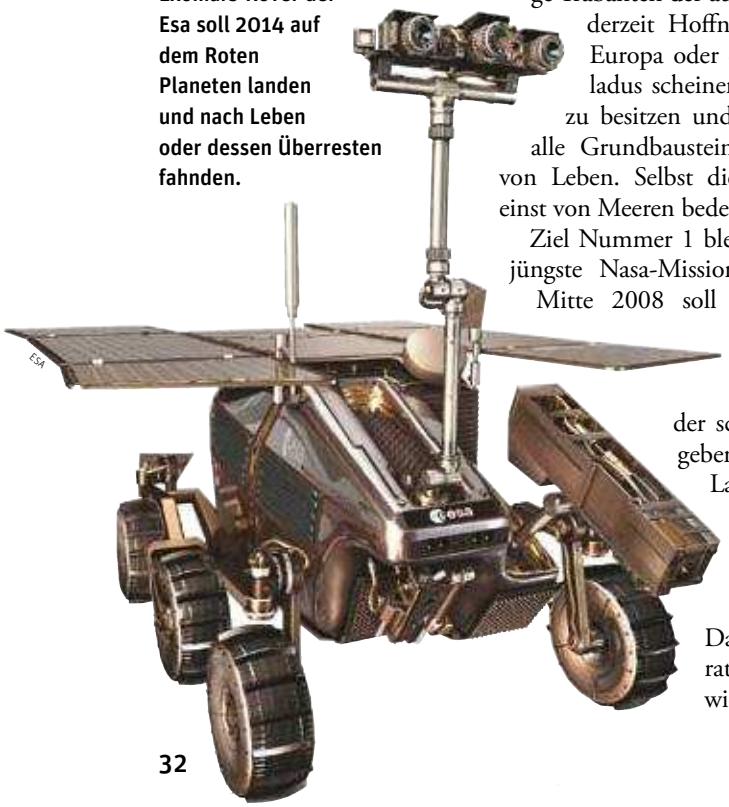
kinetischen Impaktors erscheint auch bei der Nasa vielen als die beste Lösung«, sagt Harris. Das Projekt aufzuteilen wäre kein Problem, denn Don Quijote besteht aus zwei Sonden. Hidalgo würde auf den noch auszuwählenden Asteroiden rasen, während Sancho aus sicherer Entfernung zuschaut und die Wirkung des Einschlags überprüft.

Doch selbst dies wäre nur ein erster Test. Kündigt sich tatsächlich eine Katastrophe an, ist zu hoffen, dass wir noch mindestens zwanzig Jahre Zeit bis zum Einschlag haben.

3 Leben im Sonnensystem

In letzter Zeit ist die Zahl der Orte im Sonnensystem wieder gewachsen, an denen man plausiblerweise Leben oder seine Vorformen vermuten könnte. Auch einige Trabanten der äußeren Planeten wecken derzeit Hoffnungen. Jupiters Mond Europa oder der Saturnmond Enceladus scheinen unterirdische Ozeane zu besitzen und verfügen zudem über alle Grundbausteine für die Entstehung von Leben. Selbst die heiße Venus könnte einst von Meeren bedeckt gewesen sein.

Mit Roboterarm und Bohrer auf dem Mars unterwegs. Der Exomars-Rover der Esa soll 2014 auf dem Roten Planeten landen und nach Leben oder dessen Überresten fahnden.



ESA

Ziel Nummer 1 bleibt aber der Mars. Die jüngste Nasa-Mission startete im August: Mitte 2008 soll Phoenix in der weitgehend unerforschten nordpolaren Region niedergehen. Gemäß der schon vor Jahren ausgegebenen Devise wird das Landegerät mit einem Roboterarm einige Zentimeter tief graben und Eisablagerungen untersuchen. Das Mars Science Laboratory (MSL) hingegen ist wieder als mobile Mission konzipiert. Der 1,5 Milliarden Dollar teure autogroße Rover soll Ende 2009 von der Erde abheben.

Allmählich aber wandeln sich die Suchstrategien wieder hin zur direkten Suche nach Leben oder seinen Überresten. Der für 2013 geplante Exomars-Rover der Esa kann mit seinem Bohrer bis zu zwei Meter tief in den Boden dringen und durch die giftige Oberfläche zu Schichten vorstoßen, in denen organisches Material überlebt haben könnte. »Um den Jahreswechsel herum erwarten wir die endgültige Zustimmung zu dieser Mission«, sagt Manfred Warhaut, Leiter des Missionsbetriebs beim Esoc, dem Esa-Raumflugkontrollzentrum in Darmstadt.

Für die meisten Wissenschaftler jedoch hätten Bodenproben, die zur Erde gebracht werden, die höchste Priorität. Sie sind für die Suche nach Leben ebenso wichtig wie für die Erforschung des Sonnensystems. Eine entsprechende Mars-Mission wäre jedoch ein Multi-Milliarden-Dollar-Projekt, das die unterfinanzierte Nasa frühestens 2024 stemmen könnte. Ein schmaler Lichtstreif am Horizont zeigte sich indessen im Frühjahr. Würde das MSL modifiziert, könnte der Rover Bodenproben zumindest schon einmal sammeln und aufbewahren. Eines Tages würden sie, so die noch sehr vagen Pläne, von einer späteren Mission in den Orbit gehievt und von dort aus mit einer weiteren Sonde zur Erde transportiert werden.

Auch die Esa plant eine Mars-Sample-Return-Mission. Ursprünglich sollte sie schon Anfang des kommenden Jahrzehnts starten, derzeit ist eher von 2018 bis 2022 die Rede. Sie wäre ein echtes Novum: Gleich fünf Fluggeräte würden sich auf den Weg machen. Eines davon müsste nach der Landung wieder von der Oberfläche abheben und die Proben an eine weitere Sonde übergeben, die für den Eintritt in die Erdatmosphäre gerüstet wäre. »Schon die Kometen-

sonde Rosetta war als Sample-Return-Mission geplant«, berichtet Warhaut – wegen allzu hoher technischer Anforderungen wird sie aber nur eine Landesonde auf Tschurjumow-Gerasimenko absetzen. Material vom Marsmond Phobos indessen könnte bereits 2012 auf der Erde eintreffen. Die russisch-chinesische Mission Phobos-Grund soll 2009 abheben. Die geringe Schwerkraft des Mondes macht es ihr leichter: Zum Start der Rückkehrkapsel wird deutlich weniger Schub benötigt.

Im Januar begann die Nasa, auch Missionen zu Europa und zum Saturnmond Titan ernsthaft zu konzipieren. In beiden Fällen kann man über die Existenz von Leben oder seinen Vorformen zumindest spekulieren. Welches der beiden Ziele die US-Behörde Ende des kommenden Jahrzehnts ansteuert, will sie 2008 entscheiden. 2 Milliarden Dollar dürfte das Unternehmen kosten, das andere Ziel müsste ein weiteres Jahrzehnt warten.

Unterirdischer Ozean auf Europa?

Für den Besuch von Titan ist ein Landegerät angedacht, das Bodenproben entnehmen kann. Sein Vorgänger, der (europäische) Lander Huygens der (amerikanischen) Cassini-Mission, war im Januar 2005 nur dafür gerüstet, eine halbe Stunde lang auf der Mondoberfläche zu überleben. »Spätestens seit diesem Zeitpunkt aber sind wir bei planetaren Missionen in Augenhöhe mit den Amerikanern«, sagt Warhaut. »Zumal wir das ganze Spektrum an Daten bieten konnten, sogar Tonaufnahmen aus der Atmosphäre.«

Auf Titan ließe sich auch ein Novum der Weltraumforschung erproben. In seiner erdähnlichen Atmosphäre könnte ein Heißluftballon an verschiedenen Orten Bodenproben sammeln. »Seine Aufgabe wäre die Analyse organischer Materie an der Oberfläche«, so Jonathan Lunine von der Universität von Arizona: Möglicherweise existieren zumindest »systematische Trends, die auf den Beginn einer Selbstorganisation hindeuten«.

Der Jupitermond Europa hingegen wäre wegen seines vermuteten unterirdischen Ozeans interessant. Dessen Existenz könnte bereits ein Orbiter nachweisen. Auf einer Umlaufbahn müsste er überprüfen, ob sich Form und Schwerefeld des Monds durch Jupiters Gezeitenkräfte verändern. Gibt es tatsächlich ein unterirdisches Meer, hebt und senkt sich Europas Oberfläche regelmäßig um 30 Meter. Magnetfeldmessungen und ein Radar, das unter die Oberfläche blickt, würden bei der Arbeit helfen.

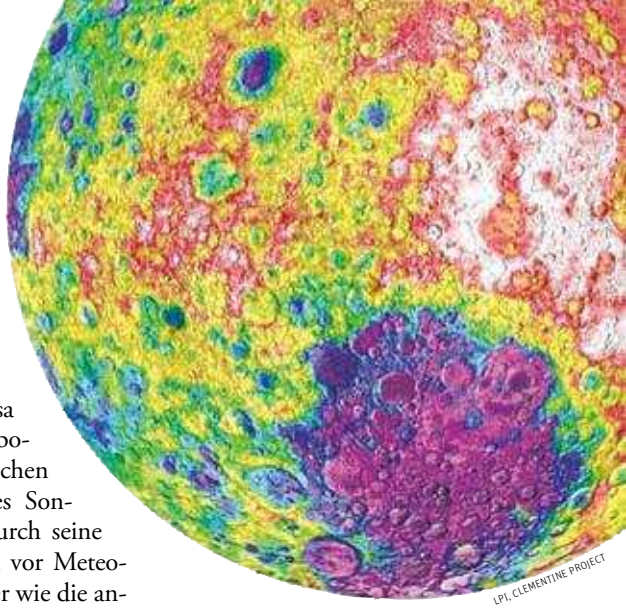
4 Entstehung der Planeten

Offene Fragen haben Forscher auch zum Prozess der Entstehung der Planeten. Eine der wichtigsten gilt Jupiter und könnte ab 2011 vom Jupiter-Orbiter Juno der Nasa beantwortet werden. Als »Erstgeborener« hatte der Gasplanet erheblichen Einfluss auf die Entwicklung des Sonnensystems, zudem könnte er durch seine Gravitation die inneren Planeten vor Meteoroiden geschützt haben. Aber ist er wie die anderen Planeten langsam angewachsen – oder wurde er, wie ein kleiner Stern, durch einen Schwerkraftkollaps geformt? Ist er weiter draußen im Sonnensystem entstanden, wie sein hoher Anteil an schweren Elementen nahelegt? Dann hätte er sich erst später nach nach innen bewegt und dabei auf seinem Weg kleinere Planeten aus der Bahn geworfen.

Auch eine Nachfolgemission für Stardust hat unter Planetenforschern Priorität. Die US-Sonde brachte im vergangenen Jahr zwar Materieproben aus der Koma eines Kometen zur Erde. Doch damit haben wir »nur an der Oberfläche gekratzt«, sagt der Chef des Stardust-Teams, Donald Brownlee von der Universität Washington. Aber immerhin: »Stardust bewies, dass Kometen Materie aus der Frühzeit des Sonnensystems, aus dem gesamten solaren Urnebel, aufgesammelt und bis heute in Eis konserviert haben.« Nun plant auch Japans Raumfahrtagentur Jaxa die Entnahme von Proben aus einem Kometenkern.

Rosetta indessen wird Kometenmaterial vor Ort untersuchen. Der Orbiter der Esa-Mission, der erst kürzlich dicht am Mars vorbeiflog, um sich beschleunigen zu lassen, soll Tschurjumow-Gerasimenko 2014 erreichen und unter anderem die Koma des Kometen analysieren. Für Bohrungen in der dunklen, organischen Kruste ist das Landegerät Philae verantwortlich, das sich beim Aufsetzen mit Hilfe einer Harpune fest am Kometen verankern wird. Proben von Eis und Gasen soll es ebenfalls unter die Lupe nehmen.

Doch es muss nicht immer gleich ein Kometenkern sein. Auch über neue Proben vom altbekannten Mond würden sich Kosmoarchäologen freuen, etwa aus dem Aitken-Becken. Der Einschlagkrater auf seiner erdabgewandten Seite ist so groß wie ein ganzer Kontinent, vielleicht der größte des Sonnensystems. Er stammt aus der letzten Phase der Planetenentstehung, sodass er Aufschluss über deren Ende geben könnte. Eine 500 Millionen Dollar teure Robotermission denkt die Nasa daher schon an.



LPI, CLEMENTINE PROJECT

Der wohl größte Krater im Sonnensystem. Das Aitken-Becken nahe dem lunaren Südpol ist ein zwölf Kilometer tiefer Krater (purpurner Fleck), der 2500 Kilometer durchmisst. Die Bestimmung seines Alters spielt eine wichtige Rolle bei der Aufklärung der späten Phasen der Planetenentstehung.

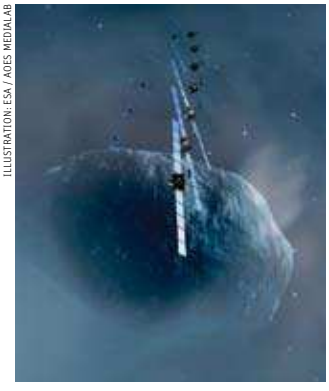


ILLUSTRATION: ESA / AOES MEDIALAB

Rosetta wird die erste Raumsonde sein, die in eine Umlaufbahn um einen Kometen einschwenkt. Ihr Landegerät Philae soll die Oberfläche von Tschurjumow-Gerasimenko untersuchen.

ILLUSTRATION: JAXA

Die 2003 gestartete japanische Sonde Hayabusa versuchte 2005, Proben eines Asteroiden einzusammeln. Ob das glückte, ist unklar. 2010 soll sie auf die Erde zurückkehren. Der »Falke« gilt trotz großer Probleme als Vorbild für Sample-Return-Missionen zu Kometen.

ILLUSTRATION: ESA

Vor allem leicht soll es werden. Das Sonnensegel, mit dessen Hilfe eine Sonde die Grenzen des Sonnensystems überschreiten könnte, dürfte maximal rund ein Gramm pro Quadratmeter wiegen – einschließlich der tragenden Streben. Gegenwärtig sind 20 Gramm erreichbar.

Der Venus könnte ebenfalls bald wieder eine Reise gelten. Vielleicht passt auch sie in einen vermuteten Ablauf, wonach die Asteroiden des Asteroidengürtels zeitlich vor dem Mars entstanden und Letzterer wiederum vor der Erde. Jupiter könnte diese zur Sonne hin laufende Welle der Planetenentstehung angeregt haben. Doch betraf sie auch die Venus? »Darüber wissen wir absolut nichts«, sagt Doug Lin, Fachmann für Planetenentstehung von der Universität von Kalifornien in Santa Cruz.

Zwar befindet sich der Planet noch innerhalb der bewohnbaren Zone des Sonnensystems, definiert als jene Orte, an denen dauerhaft flüssiges Wasser existieren kann. Mit ihren säurehaltigen Wolken, ihrem enormen Luftdruck und ihren höllischen Temperaturen ist die Venus dennoch alles andere als eine freundliche Umgebung. Auch hier könnte ein Ballon vielleicht lange genug auf der Oberfläche verweilen, um Bodenproben zu entnehmen. Danach müsste er allerdings rasch wieder in kühlere Höhen aufsteigen, dort in aller Ruhe die Proben analysieren oder, besser noch, sie zur Erde weiterschicken.

5 Ausbruch aus dem Sonnensystem

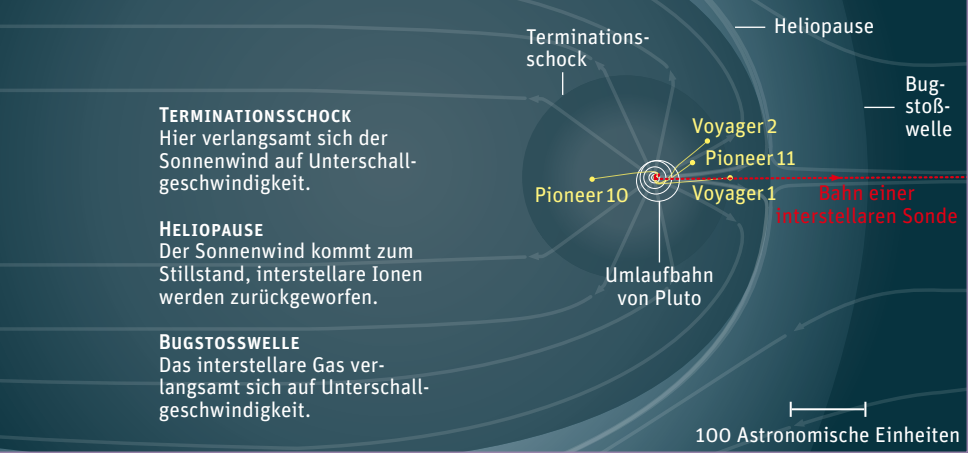
Manchmal erhält die Weltraumforschung ausdrückliche Unterstützung von der Öffentlichkeit. Als vor zwei Jahren eine Budgetkrise die ehrwürdigen Voyager-Sonden bedrohte, gab es einen Aufschrei der Empörung – und die Missionen wurden fortgesetzt. Voyager 1 ist derzeit 104 Astronomische Einheiten (AE) entfernt, also über hundertmal so weit, wie der Abstand zwischen Erde und Sonne beträgt. Jedes Jahr kommen weitere 3,6 AE hinzu. Schon im Jahr 2002 (oder 2004, ganz einig sind sich die Wissenschaftler nicht) hatte Voyager 1 die Grenze des Sonnensystems erreicht, wo die Teilchen des Sonnenwinds auf das interstellare Medium treffen.

Nun soll eine neue Sonde hinterhergeschickt werden, wie das NRC bereits 2004 empfahl. Sie hätte viel zu tun: Sie könnte die Frage beantworten, welcher Anteil der organischen Aminosäuren im Sonnensystem aus dem interstellaren Raum stammt. Zudem könnte sie nach Antiteilchen suchen, die aus kleinen Schwarzen Löchern oder aus dem Zerfall Dunkler Materie stammen. Sie könnte herausfinden, wie das Sonnensystem gegen kosmische Strahlung abgeschirmt wird, die möglicherweise einen Einfluss auf das irdische Klima hat. Auch könnte sie Magnetfelder im interstellaren Raum entdecken, die eine möglicherweise entscheidende Rolle bei der Sternentstehung spielen.

Nicht zuletzt könnte die Sonde wie ein winziges Weltraumteleskop arbeiten und, ungehindert vom Staub im Sonnensystem, kosmologische Beobachtungen durchführen. Die »Pioneer-Anomalie«, unerklärliche Bahnabweichungen von Pioneer 10 und 11, müsste sie ebenfalls untersuchen. Und sobald sie das Sonnensystem verlassen hat, könnte sie die Allgemeine Relativitätstheorie testen, indem sie feststellt, wo die Schwerkraft der Sonne das Licht ferner Sterne fokussiert. Das Fernziel der Reise, nach Zehntausenden von Jahren, könn-

Reise über die Grenze

Vor ihrer Reise zu einem anderen Stern könnte eine interstellare Sonde zunächst den Rand des Sonnensystems erforschen. (Die gestauchte Form der gezeigten Heliosphäre ist Resultat von deren Eigenbewegung durch die Galaxis.)



Terminationsschock
Hier verlangsamt sich der Sonnenwind auf Unterschallgeschwindigkeit.

Heliopause
Der Sonnenwind kommt zum Stillstand, interstellare Ionen werden zurückgeworfen.

Bugstosswelle
Das interstellare Gas verlangsamt sich auf Unterschallgeschwindigkeit.

GRAFIK: LUCY READING-IKKANDA

te schließlich ein naher Stern wie der 10,5 Lichtjahre entfernte Epsilon Eridani sein.

Die ersten Daten vom Rand des Sonnensystems hätten die Astronomen hingegen gerne schon früher. Um die Sonde innerhalb der Lebenszeit eines Wissenschaftlers (und ihrer Plutoniumbatterie) mehrere hundert AE weit hinauszubringen, muss sie auf eine Geschwindigkeit von 15 AE pro Jahr beschleunigt werden. Drei »Motor«-Varianten kommen dafür in Frage. Die »große« ist ein Ionenantrieb mit Kernreaktor, die mittlere ein Ionenantrieb mit Plutoniumgenerator. Variante drei ist ein Sonnensegel.

Bereits 2005 entstanden Entwürfe für zwei Missionen: eine große mit 36 Tonnen und eine mittlere mit einer Tonne Gewicht. Thomas Zurbuchen von der Universität von Michigan in Ann Arbor und Ralph McNutt von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore hatten die Entwicklerteams geleitet. Derzeit allerdings verbucht die leichteste Variante die gewichtigsten Vorteile für sich, sodass die Esa einen entsprechenden Vorschlag von Robert Wimmer-Schweingruber von der Universität Kiel in Betracht zieht. Möglicherweise will sich auch die Nasa beteiligen.

Jenseits des Merkurs von derSonnenstrahlung profitieren

Wimmer-Schweingruber und sein internationales Team gehen von einer 500 Kilogramm schweren Sonde aus, die durch ein 200 Meter großes Sonnensegel angetrieben wird. Die Sonde soll zunächst die Merkurbahn passieren, um dort von der intensiven Sonnenstrahlung zu profitieren. Nach einem Schwenk des Segels nimmt sie dann Kurs auf die Jupiterbahn. Kurz vor der Ankunft wirft sie das Segel ab und schwebt antriebslos weiter.

Ein entsprechend leichtes Segel, das vermutlich auf einer hochstabilen Polyesterfolie basieren wird, müsste allerdings erst einmal entwickelt und bei weniger anspruchsvollen Missionen getestet werden. Doch »eine solche Mission, ob sie die Esa oder die Nasa leitet, ist der nächste logische Schritt unserer Erforschung des Weltraums«, sagt Wimmer-Schweingruber. »Schließlich besteht das All nicht nur aus unserer unmittelbaren lokalen Nachbarschaft.«

2 Milliarden Dollar wären für die grenzüberschreitende Sonde aufzubringen, die Betriebskosten über drei Jahrzehnte bereits eingeschlossen. Ihr Geld wäre die Mission aber wohl wert. Die Erforschung unserer Nachbarplaneten half dabei, die Erde zu verstehen – nun könnte die Untersuchung der interstellaren Umgebung helfen, unser Sonnensystem besser zu verstehen. ◁

RANDZONE

- Auch dreißig Jahre nach ihrer Entdeckung bleibt die Pioneer-Anomalie ein Rätsel: Pioneer 10 und 11, die das Sonnensystem derzeit in entgegengesetzter Richtung verlassen, erfahren beide eine unerwartete Abbremsung.
- Alle erdenklichen Effekte zog man bereits vergeblich zur Erklärung heran: Sonnenwind, Wärmeabstrahlung, Beschleunigung durch Treibstoffverluste, falsche Abschätzungen der Massen im Sonnensystem und vieles mehr. Auch Messfehler lassen sich ausschließen, wie Claus Lämmerzahl und Hansjörg Dittus im Physik Journal (1/2006, Nr. 1) berichteten.
- Auch die Sonden Galileo und Ulysses scheinen betroffen. Doch nur die Pioneer-Zwillinge lieferten so präzise Navigationsdaten, dass sich der Effekt zweifelsfrei feststellen lässt.
- Spekuliert wird unter ande rem, dass er mit der von der Hubble-Konstanten beschriebenen Expansion des Universums zu tun hat. Einer der diesbezüglichen Hinweise: Die Stärke der Abbremsung ist ungefähr so groß wie das Produkt aus Hubble-Konstante und Lichtgeschwindigkeit.

George Musser
ist Redakteur bei Scientific American.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/905474.

... 5 ... 4 ... 3 ... 2 ... 1 ...

Countdown für:
Raumfahrt
Kosmos
ScienceFiction

JETZT im Zeitschriften-handel

> Blättern Sie im Internet durch das aktuelle Heft:

www.astronomie-heute.de/start

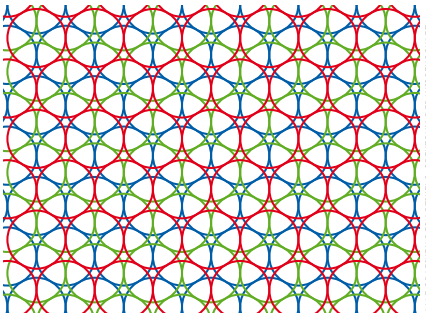
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751 | service@spektrum.com

Spektrum der Wissenschaft — Wissen aus erster Hand

KRISTALLOGRAFIE

Wie Atome den Raum unter sich aufteilen

Jedes Atom in einem Kristallgitter hat seinen »Einzugsbereich« aus allen Punkten, die ihm selbst näher liegen als jedem anderen Atom. Zusammen füllen diese Polyeder den Raum lückenlos aus.



ALLE GRAFIKEN DES ARTIKELS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; NACH: NORBERT TREITZ

Schichten in einem Stapel von dichtestgepackten Kugeln, genau von »oben« gesehen. Jeder Schicht entspricht eine Farbe.

Von Norbert Treitz

Wenn Sie in der Leitstelle für Rettungseinsätze dafür zuständig sind, den Hubschrauber mit dem Verletzten stets in das nächstgelegene Krankenhaus zu dirigieren, werden Sie in einer Landkarte alle Krankenhäuser als Punkte einzeichnen und dazu die Mittelsenkrechten auf den Verbindungsstrecken je zweier Krankenhäuser. Jeder »Einzugsbereich« eines Krankenhauses, das heißt die Menge aller Punkte, die diesem Krankenhaus näher liegen als jedem anderen, werden dann von Stücken dieser Mittelsenkrechten begrenzt.

Solche Einzugsbereiche (»Zellen«) kann man auch in drei Dimensionen konstruieren. Typischerweise sind die Zentren dabei Atome in einem Kristall. An die Stelle der Mittelsenkrechten tritt bei der Konstruktion die »Spiegelebene«, die rechtwinklig auf der Verbindungsstrecke zweier Atome im Mittelpunkt dieser Strecke steht: Jedes Atom sieht sein eigenes Spiegelbild genau dort, wo in der Wirklichkeit das Nachbaratom sitzt. Die Einzugsbereiche der Atome werden nach Johann Peter Gustav Lejeune Dirichlet (1805–1859) oder nach Georgi Voronoi (1868–1908) und insbesondere bei Kristallen nach Eugene Wigner (1902–1995) und Frederick Seitz (*1911) benannt.

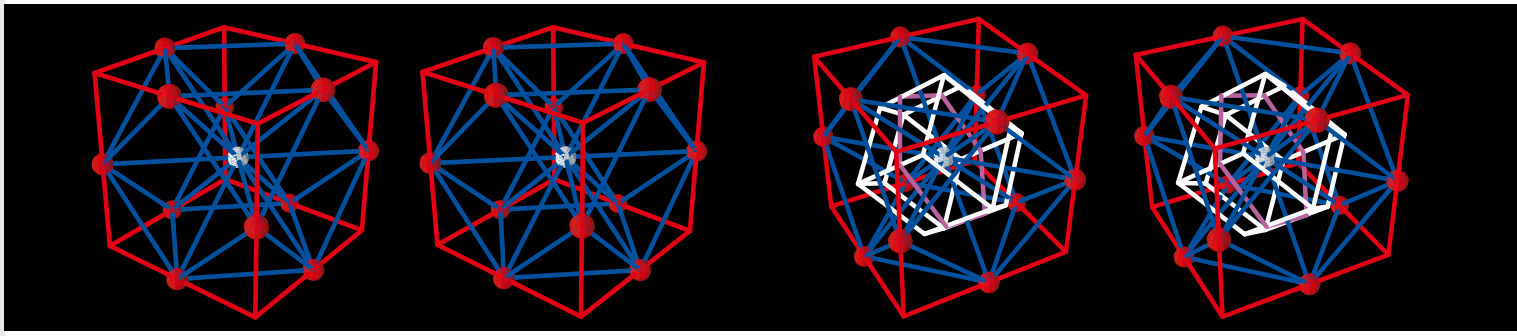
Sehen wir uns zunächst solche Kristallgitter an, die nur eine Atomsorte enthalten. Die Anzahl nächster Nachbarn, die ein Atom darin hat, heißt Koordinationszahl, aber auch die zweitnächsten Nachbarn sind gelegentlich bedeutsam.

In einem solchen Kristall sind die Wigner-Seitz-Zellen aller Atome gleich. Obendrein müssen sie Raumfüller sein, das heißt Polyeder, aus deren gleichen Exemplaren man den Raum nach allen Seiten ohne Lücken und ohne Überlappungen vollstapeln kann. Das geht sehr einfach mit Würfeln; man darf auch alle Würfel durch Verkleinern oder Vergrößern in einer oder zwei Dimensionen zu Quadern deformieren und diese dann durch Scherungen zu Parallelogramm-Hexaedern. Die Raumfüller mit größter Symmetrie sind neben dem Würfel der Oktaederstumpf und das Rhombendodekaeder, die wir in der Septemberausgabe näher kennen gelernt haben.

Stellen wir uns vorläufig die Atome kugelförmig vor und versuchen sie möglichst dicht zu einem Kristall zusammenzupacken. Wenn man Kugeln in eine Kiste mit ebenem Boden füllt, ergibt sich fast von selbst das Dreiecksraster als dichteste Packung (zum Beispiel die blauen Kreise im Bild oben). Die zweite Schicht Kugeln gerät ebenso zwangsläufig über die Zwischenräume der untersten Schicht, aber dafür gibt es nun zwei Möglichkeiten, die hier rot und grün gezeichnet sind. Für die dritte Schicht hat man wieder zwei der drei dargestellten Positionen zur Auswahl.

Zwölf Nachbarn: dichteste Packungen

Allgemein kann man die Schichten mit den blau, rot und grün gezeichneten Varianten beliebig aufeinanderlegen, nur nicht zwei gleiche unmittelbar übereinander. In allen diesen Fällen füllen die Kugeln etwas mehr als 74 Prozent des Gesamtvolumens, ein Wert, den schon Johannes Kepler für nicht mehr verbesserungsfähig hielt. Der Beweis der Kepler'schen Vermutung durch Thomas Hales ist berühmt geworden, weil er die Geduld der Gutachter überforderte (Spektrum der Wissenschaft 4/1999, S. 10, und 9/2003, S. 13).



Die nächsten Nachbarn eines Atoms im kubisch-flächenzentrierten Gitter bilden ein Kuboktaeder (links). Die zugehörige Wigner-Seitz-Zelle ist ein Rhombendodekaeder (rechts).

Zu den Stereobildern

Schauen Sie nahezu parallel mit beiden Augen auf die jeweils zwei Teilbilder, sodass Sie das Bild dreifach sehen. Im mittleren Bild stellt sich dann der räumliche Eindruck ein. Um diesen Effekt zu erzielen, muss man die Akkomodation der Augen – auf die nahe liegende Papierfläche – und die Ausrichtung der Augenachsen – in die Ferne – voneinander abkoppeln. Dafür sind etwas Geduld und Übung nötig und lohnend.

Nehmen wir nun an, dass die drei verschiedenen Schichten sich der Reihe nach abwechseln, sodass jede Schicht zwei verschiedenartige Nachbarschichten hat. Genau dann bilden die zwölf nächsten Nachbarn eines jeden Atoms – sechs in der eigenen Schicht und je drei in der oberen und der unteren Nachbarschicht – ein archimedisches Kuboktaeder aus sechs Quadraten und acht gleichseitigen Dreiecken (Bild S. 36 unten, links). Dieses Polyeder hat die volle Symmetrie des Würfels, also neun Spiegelebenen, drei Achsen für Vierteldrehungen, vier für Dritteldrehungen und sechs für Halbdrehungen.

Der Umkugelradius des Kuboktaeders ist gleich seiner Kantenlänge. Man kann den Körper also in drei- und vierzählige Pyramiden zerlegen, die den Körpermittelpunkt als Spitze und eine Seitenfläche als Grundfläche haben, und es stellt sich heraus, dass es sich um regelmäßige Tetraeder und halbe regelmäßige Oktaeder handelt.

Die Ecken des Kuboktaeders sind die Kantenmitten eines Würfels. Verschiebt man diesen Würfel um eine halbe Kantenlänge in eine der drei Raumrichtungen, so sitzen die Atome auf den Ecken und auf den Flächenmitten, aber nicht mehr in der Würfelmitte. Das Gitter heißt daher »kubisch-flächenzentriert« (*face-centered cubic*, FCC).

Setzt man rechtwinklig auf die Mitte jeder Verbindung benachbarter Atome Spiegelebenen, so begrenzen diese zwölf Ebenen ein Rhombendodekaeder; das ist die Wigner-Seitz-Zelle des kubisch-flächenzentrierten Gitters. Dieser Körper wird von zwölf gleichen Rauten mit dem Diagonalenverhältnis $\sqrt{2}$ begrenzt und hat zweierlei Ecken. Sechs davon – die »spitzen Rautenecken« – sind Ecken eines Oktaeders und zugleich Mitten der Quadrate, die das Kuboktaeder bilden. Die anderen acht – die »stumpfen« – bilden einen Würfel. Zerlegt man das Kuboktaeder wie oben beschrieben in acht reguläre Tetraeder und sechs halbe reguläre Oktaeder, so liegen diese acht Ecken in den Mittelpunkten der Tetraeder.

Der andere wichtige Spezialfall der dichtesten Kugelpackung ist der fortgesetzte Wechsel von nur zwei Schicht-Positionen (zum Beispiel blau und rot im Bild links oben). Die Koordinationszahl ist auch jetzt 12, aber das Polyeder der nächsten Nachbarn ist kein Kuboktaeder mehr; vielmehr wird dieses gewissermaßen in der Mitte durchgeschnitten und verdreht wieder zusammengesetzt. In Norman Johnsons Klassifikation aller konvexen Polyeder, die irgendwie aus regelmäßigen Vielecken zusammengesetzt sind, hat der Körper die Nummer 27 und den Namen »dreizählige Doppelkuppel« *(triangular orthobicupola)*. Er hat deutlich weniger Symmetrie als sein unverdrehtes Gegenstück.

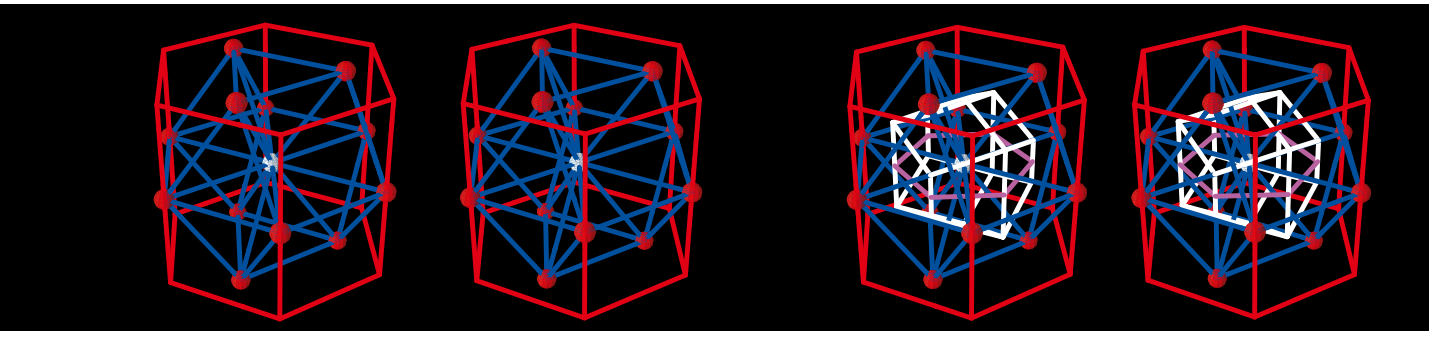
Die entsprechende Wigner-Seitz-Zelle findet man erstaunlicherweise genau so, wie man vom Kuboktaeder zur Doppelkuppel kommt: Man zerschneide das Rhombendodekaeder, das für die kubisch-flächenzentrierte Packung die Wigner-Seitz-Zelle ist, in der Mitte und setze die beiden Hälften um 60 Grad gegeneinander verdreht wieder zusammen (Bild unten, rechts).

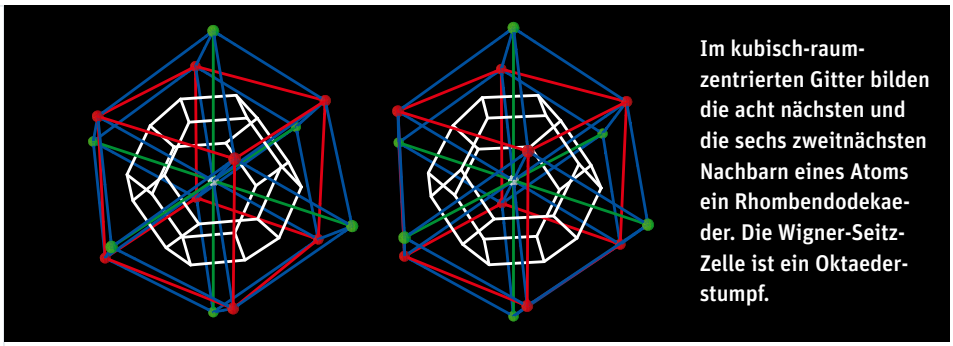
Merkwürdigerweise begnügen sich bei nicht wenigen Elementen die Atome mit nur acht Nachbarn im Kristallgitter; aber die Tatsache, dass dabei die zweitnächsten Nachbarn nicht ganz so außer Sichtweite sind, entschädigt sie für den Mangel an kuscheliger Nähe. Das ist zum Beispiel dann der Fall, wenn in einer Aufteilung des Raums in Würfelzellen alle Ecken und Würfelmittelpunkte mit Atomen besetzt sind. Das ist die kubisch-raumzentrierte (*body-centered cubic*, BCC) Packung. In jeder Würfelzelle sitzen sozusagen zwei Atome, ein ganzes in der Mitte und acht achtel an den Ecken. Gleich große, einander berührende Kugeln in dieser Anordnung füllen den Raum zu $\pi\sqrt{3}/8 = 68$ Prozent, denn ihr Radius ist 1/4 der Würfel-Raumdiagonale, die ihrerseits gleich $\sqrt{3}$ mal der Kantenlänge ist.

Acht nächste und sechs zweitnächste Nachbarn

Die Wigner-Seitz-Zelle muss durch Spiegelebenen zwischen einem Atom und seinen nächsten Nachbarn begrenzt werden. Bei acht solchen Nachbarn gibt das ein Oktaeder, und wegen der Würfelsymmetrie ein reguläres. Das ist aber noch nicht die ganze Wahrheit, denn das Oktaeder ragt mit seinen Spitzen aus dem Würfel heraus in die Gefilde zweitnächster Nachbarn. Die Spiegelebenen zu diesen sind einfach die Wände der Würfelzelle, sie schneiden vom Oktaeder sechs Pyramiden ab und machen aus ihm einen Oktaederstumpf (Bild S. 38 oben).

In der hexagonal dichtesten Kugelpackung bilden die nächsten Nachbarn eines Atoms eine Doppelkuppel (links); seine Wigner-Seitz-Zelle ist ein Raumfüller aus sechs Rauten und sechs Trapezen, die aus je zwei halben Rauten zusammengesetzt sind. Das violette reguläre Sechseck ist die Schnittebene, entlang der »verdreht« wird.





Im kubisch-raumzentrierten Gitter bilden die acht nächsten und die sechs zweitnächsten Nachbarn eines Atoms ein Rhombendodekaeder. Die Wigner-Seitz-Zelle ist ein Oktaederstumpf.

Der ist sogar so regelmäßig, wie er nur sein kann: begrenzt von sechs Quadraten und acht regelmäßigen Sechsecken. Wegen seiner stumpfen Ecken ist dieser Raumfüller auch als Zellenform für Schaum gut geeignet, wie wir im September gesehen haben.

Sechs Nachbarn: Wegen Primitivität verschmäht

Das einfachste aller Gitter, jedenfalls für Freunde kartesischer Koordinaten und rechter Winkel, ist das primitiv-kubische. Man setzt jedes Atom in eine würfelförmige Schachtel und stapelt diese. Die Kugelfüllung beträgt dabei schäbige $\pi/6 = 52$ Prozent.

Diese Anordnung ist so unelegant, dass nur Polonium sie durchwegs verwendet, einige andere Elemente immerhin unter bestimmten Bedingungen. Es gibt aber Kristalle, die man als primitiv-kubisch auffassen kann, wenn man die beiden Ionensorten, aus denen sie bestehen, nicht unterscheidet. Das gilt insbesondere für alle Salze aus einem Alkalimetall (zum Beispiel Natrium) und einem Halogen (zum Beispiel Chlor). So werden im Kochsalzkristall die Punkte mit ungeraden Koordinatensummen von Na^+-Ionen besetzt und die mit den geraden von Cl^--Ionen.

Jedes Atom (oder Ion) hat in diesem Gitter sechs nächste Nachbarn an den Ecken eines regulären Oktaeders, zwölf zweitnächste an denen eines Kuboktaeders und acht drittnächste an denen eines Würfels.

Einigen vierwertigen Elementen (Kohlenstoff, Silizium und Germanium) kommt es noch weniger auf die räumliche Nähe zu ihresgleichen an. In manchen Fällen ziehen ihre Atome es vor, sich kovalent an nur vier Nachbarn zu binden, die möglichst an den Ecken eines regulären Tetraeders – oder, was dasselbe ist, auf jeder zweiten Ecke eines Würfels – liegen, mit dem Atom selbst im Mittelpunkt.

Nur vier Bindungen, aber feste!

Der Winkel, unter dem ein Atom zwei seiner nächsten Nachbarn sieht, ist der Tetraederwinkel $2 \arccos(\sqrt{1/3}) = 109{,}47$ Grad und kommt vor allem in der Chemie des Kohlenstoffs vor, auch in Ketten, wenn sie keine Mehrfachbindungen haben. Während die C-Atome im Benzen (= Benzol) C_6H_6 mit seinen Anderthalbfachbindungen ein ebenes reguläres Sechseck bilden, können sie das im Cyclohexan C_6H_{12} mit Einfachbindungen und Tetraederwinkeln nicht, denn diese sind kleiner als 120 Grad; der Ring muss daher in die dritte Dimension hinein geknickt sein. Das ist auf zweierlei Arten möglich, die man anschaulich als Sessel- und als Wannen-Form bezeichnet. Dabei hat der Sessel höhere Symmetrie als die Wanne. Im Diamanten haben alle Sechserringe die Sesselform (siehe Bild unten).

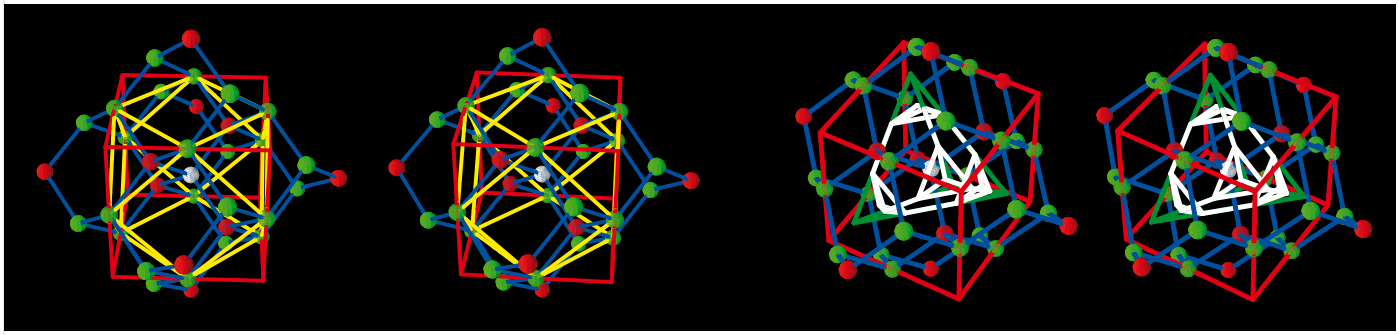
Während die nächsten Nachbarn eines Atoms stets ein reguläres Tetraeder bilden, gibt es für die zweitnächsten dieselben Auswahlmöglichkeiten wie bei den dichtesten Kugelpackungen für die nächsten. Sie können ein kubisch-flächenzentriertes Gitter bilden, mit dem Kuboktaeder als dem Polyeder der zweitnächsten Nachbarn (Bild unten), oder ein hexagonales mit der Doppelkuppel.

Zum (kubischen) Diamanten kennt man seit 1967 eine abweichende hexagonale Form, den Lonsdaleit, benannt nach Kathleen Lonsdale (1903–1971).

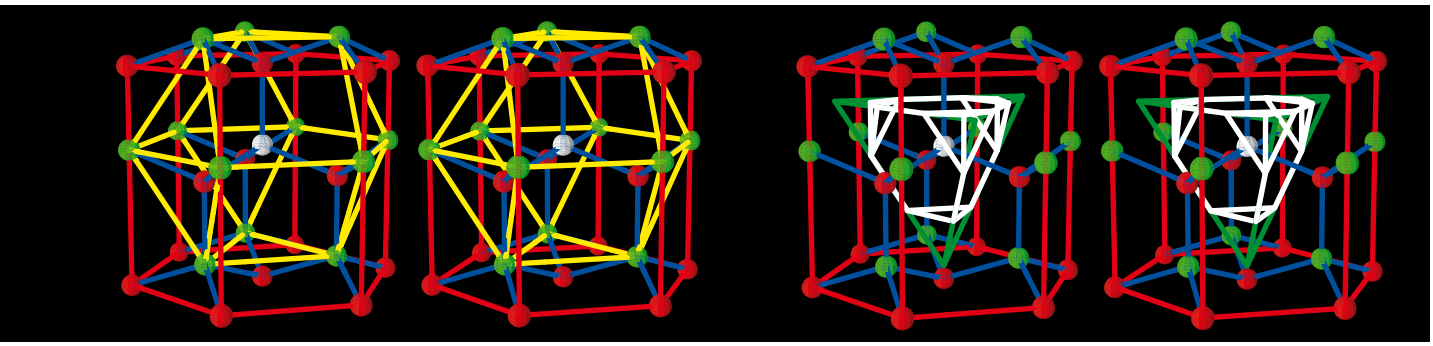
Auch einige (vor allem halbleitende) Verbindungen aus zwei verschiedenen Elementen folgen dem Schema »vier nächste Nachbarn an den Ecken eines regulären Tetraeders«. Dazu gehören zahlreiche III-V- und II-VI-Verbindungen (die römischen Zahlen geben die Spalten des Periodensystems an, aus denen die beiden Partner stammen), insbesondere Zinksulfid (ZnS). Dessen altbekannte kubische Form heißt »Zinkblende« oder »Sphalerit«; seit 1861 ist auch eine hexagonale Form bekannt. Sie heißt Wurtzit nach Charles-Adolphe Wurtz (1817–1884).

Hat ein Kristall dieser Struktur zweierlei Atome, wie im Zinksulfid, so sind die nächsten Nachbarn eines Atoms jeweils von der anderen Sorte, die zweitnächsten wieder von der ersten, und so weiter. Das gilt sowohl für die kubische als auch für die hexagonale Form.

Bei der kubischen Form wohnen in dem (roten) Translationswürfel 12 viertel Atome und 5 ganze, also per saldo 8.



Im Diamantgitter (links) liegen die nächsten Nachbarn (rot) eines Kohlenstoffatoms (weiß) an den Ecken eines Tetraeders; die zweitnächsten (grün) liegen auf den Kantenmittelpunkten eines Würfels und bilden ein Kuboktaeder (gelb). Rechts die Wigner-Seitz-Zelle des Diamantgitters (weiß)

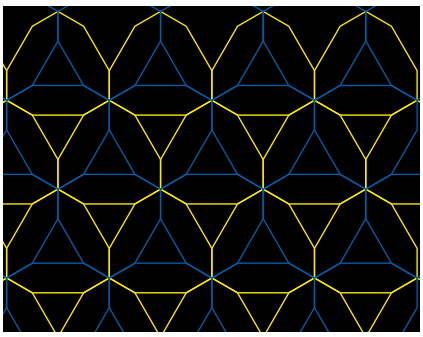


Das weniger symmetrische Gegenstück zum Diamantgitter: Lonsdaleit aus C-Atomen oder Wurtzit aus Zn und S (links): Die Doppelkuppel aus den zweitnächsten Nachbarn ist gelb eingezeichnet. Rechts die zugehörige Wigner-Seitz-Zelle (weiß)

Nimmt man wieder an, die Atome seien harte Kugeln, die sich paarweise berühren, so kommt man auf die Raumausfüllung $\pi\sqrt{3}/16 = 34$ Prozent, also exakt halb so viel wie bei der kubisch-raumzentrierten Packung. In der Tat bleibt genau die Hälfte der Plätze im BCC-Gitter leer, mit der merkwürdigen Folge, dass ausgerechnet das Gitter des mechanisch härtesten Materials, nämlich des Diamanten, geometrisch sehr locker gebaut zu sein scheint.

Schaut man dagegen die Kalottenmodelle an, die besonders in der organischen Chemie ziemlich realistische Bilder der räumlichen Molekülstrukturen liefern, so sieht man, dass dort die vierseitig einfach gebundenen C-Atome nicht wie Kugeln aussehen, sondern wie leicht abgerundete Tetraederstümpfe.

Zwei Spiegelebenen im Lonsdaleit oder Wurtzit mit Kanten der Wigner-Seitz-Zellen: gelb und blau, Blick rechtwinklig auf die Neunecke und gleichseitigen Dreiecke, schräg auf die Sechsecke. Die rechtwinkligen Dreiecke bleiben bei dieser Blickrichtung unsichtbar.



Tatsächlich durchdringen sich die Atome bei der kovalenten Bindung beträchtlich, während man bei Ionenkristallen zu einem einigermaßen konsistenten Satz von Ionenradien kommt mit der Idealisierung, dass sich benachbarte Ionen in Berührungspunkten »küssen« und im Metallgitter sogar noch etwas mehr Abstand halten für das Elektronengas.

Baut man nun ein Diamantgitter aus dem Kalottenmodell-Baukasten zusammen, so bleibt von den vermeintlich freien Plätzen nicht viel übrig. Das Bild von kleinen Atomen, die durch winkelstarre Stangen verbunden sind, weicht dann der realistischeren Vorstellung, dass die Atome viel dicker sind. Sie füllen ihre Wigner-Seitz-Zellen weit gehend aus, schlimmer noch: Sie haben sie nicht für sich allein, weil die Nachbaratome teilweise hineindringen. So wie Erbsen oder Orangen unter Druck oder Rosskastanien bei Platzmangel eckige Formen annehmen können, sollte man sich die C-Atome nicht rund, sondern eher wie ihre Wigner-Seitz-Zellen vorstellen.

Wie sehen diese nun aus? Vier Spiegelwände zu den nächsten Nachbarn bilden ein reguläres Tetraeder, das aber bekanntlich kein Raumfüller ist. Seine Spitzen ragen in die Bereiche von je drei der zweitnächsten Nachbarn hinein, ähnlich wie beim Oktaeder und seinem Stumpf im kubisch-raumzentrierten Gitter, aber etwas komplizierter. Genauer: Von dem Tetraeder, das jedes Atom für sich beansprucht, wenn es nur seine nächsten Nachbarn berücksichtigt, machen ihm seine zweitnächsten Nachbarn die »Spitzen« streitig; das sind kleine Tetraeder mit einem Drittel der Kantenlänge, die in den Ecken des großen Tetraeders sitzen. Schneiden wir diese Spitzen ab, so bleibt ein archimedischer Tetraederstumpf übrig; von jeder Tetraederkante hat das mittlere Drittel überlebt. Diesen Stumpf darf jedes Atom unangefochten als sein Eigentum auffassen.

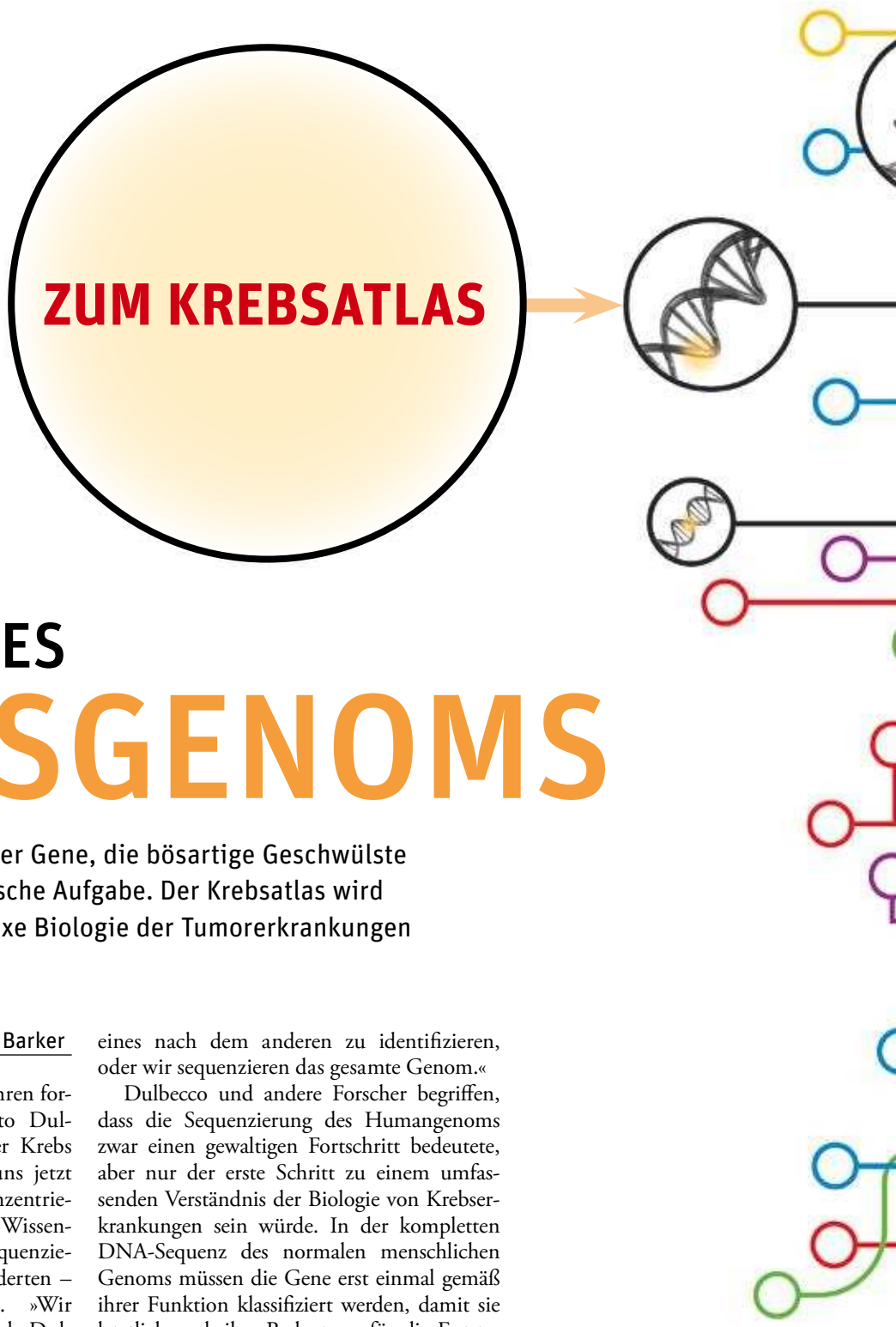
Es verbleiben Löcher in Gestalt der abgeschnittenen, ehemals von je vier Atomen beanspruchten kleinen Tetraeder. Der Mittelpunkt eines solches Tetraeders ist von diesen vier Atomen gleich weit entfernt und somit Ecke einer Wigner-Seitz-Zelle. Wir zerlegen daher die kleinen regulären Tetraeder von ihren Mittelpunkten aus in vier Tetraeder mit jeweils einem Viertel der Höhe und schlagen sie den jeweils anliegenden Tetraederstümpfen zu. Fertig ist die Wigner-Seitz-Zelle des Diamanten, sozusagen die Gestalt des Diamant-Atoms. Es ist ein Polyeder aus vier regulären Sechsecken und zwölf kleinen gleichschenkligen Dreiecken (Bild S. 38 unten, rechts).

Bei der hexagonalen Packung (Lonsdaleit oder Wurtzit) sind die Sechserringe in den Schichten, die rechtwinklig zur Dritteldrehungsachse liegen, sesselförmig und die anderen wannenförmig (Bild oben). Die Wigner-Seitz-Zelle ist wegen der gleichen vier nächsten Nachbarn der des Diamanten nicht unähnlich, aber diesmal teilen sich nicht vier, sondern nur drei Atome die kleinen Tetraeder untereinander auf. Die vierte Seite liegt nämlich in einer Spiegelebene. Das in dieser liegende Sechseck des Tetraederstumpfs wird durch drei kleine gleichschenklige Dreiecke zu einem Neuneck mit Dritteldrehungssymmetrie erweitert. Die Wigner-Seitz-Zelle hat somit als Flächen dieses Neuneck, drei reguläre Sechsecke und sechs kleine rechtwinklige Dreiecke und ein gleichseitiges (Bild links). ◁

Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen.

Stereo-Kurzfilme und Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de/artikel/905477.

SERIE PHÄNOMEN KREBS: Teil I: Krebsevolution (im Septemberheft) – Teil II: Chromosomenchaos und Krebs (im Oktoberheft) – nun abschließend Teil III: Krebsgenom-Atlas



EIN ATLAS DES KREBSGENOMS

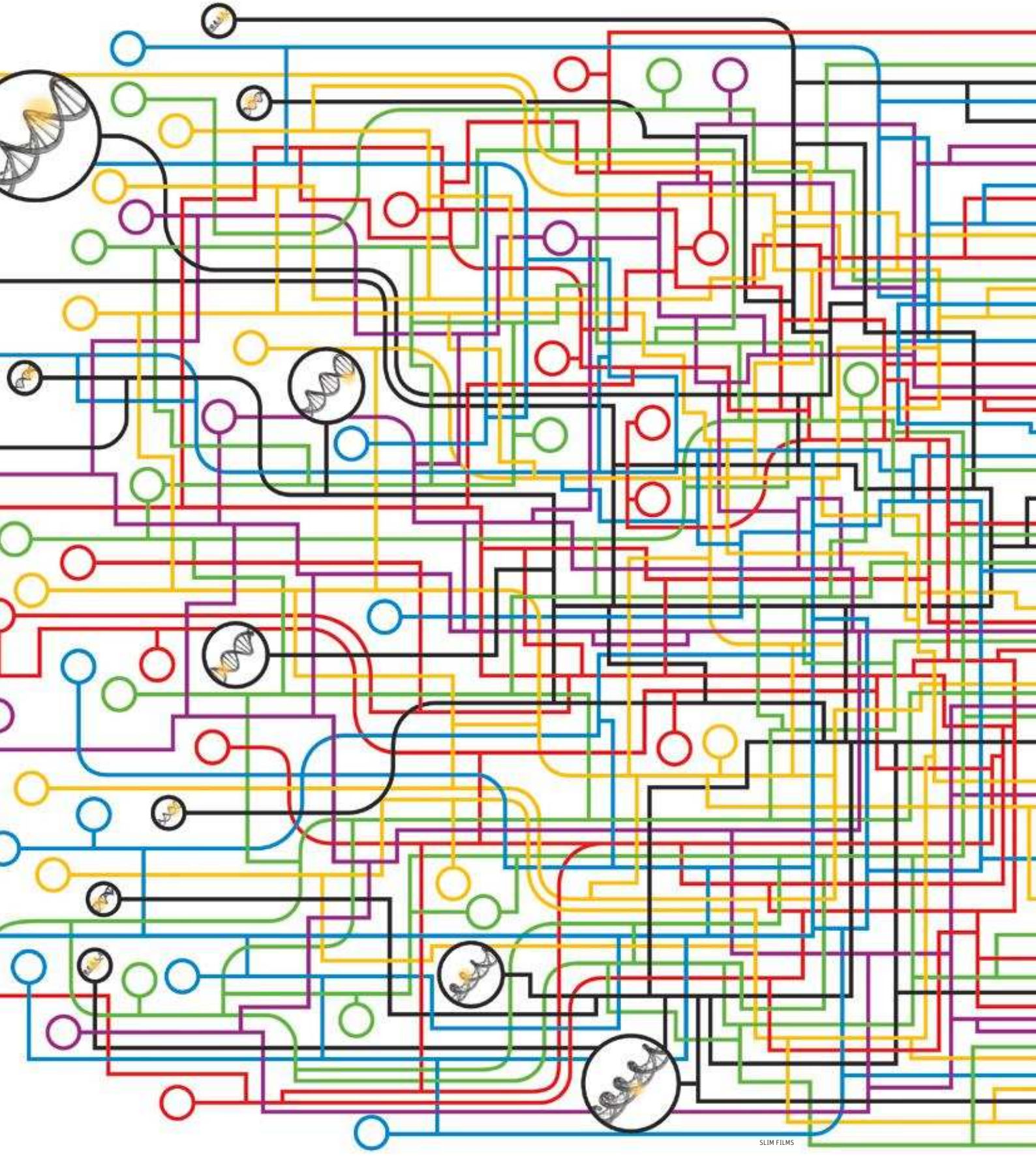
Die Katalogisierung sämtlicher Gene, die bösartige Geschwülste verursachen, ist eine gigantische Aufgabe. Der Krebsatlas wird neue Wege durch die komplexe Biologie der Tumorerkrankungen weisen.

Von Francis S. Collins und Anna D. Barker

Schon vor mehr als zwanzig Jahren forderte Nobelpreisträger Renato Dulbecco: »Wenn wir mehr über Krebs wissen wollen, müssen wir uns jetzt auf das Genom der Tumorzellen konzentrieren.« Damals war er einer der ersten Wissenschaftler, die ein Programm zur Sequenzierung des menschlichen Genoms forderten – das spätere Humangenomprojekt. »Wir stehen an einem Scheideweg«, schrieb Dulbecco, selbst ein Pionier der Krebsforschung, 1986 im Wissenschaftsjournal »Science«. »Zwei Möglichkeiten stehen uns offen: Entweder versuchen wir, die beteiligten Gene eines nach dem anderen zu identifizieren, oder wir sequenzieren das gesamte Genom.«

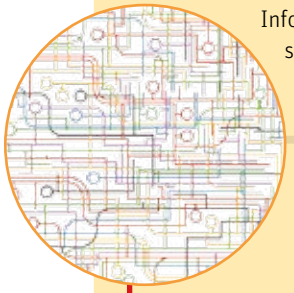
Dulbecco und andere Forscher begriffen, dass die Sequenzierung des Humangenoms zwar einen gewaltigen Fortschritt bedeutete, aber nur der erste Schritt zu einem umfassenden Verständnis der Biologie von Krebserkrankungen sein würde. In der kompletten DNA-Sequenz des normalen menschlichen Genoms müssen die Gene erst einmal gemäß ihrer Funktion klassifiziert werden, damit sie letztlich auch ihre Bedeutung für die Entstehung bösartiger Tumoren offenbaren.

In nur zwei Jahrzehnten ist aus Dulbeccos Vision Wirklichkeit geworden. Weniger als drei Jahre nach Abschluss des Humangenom-



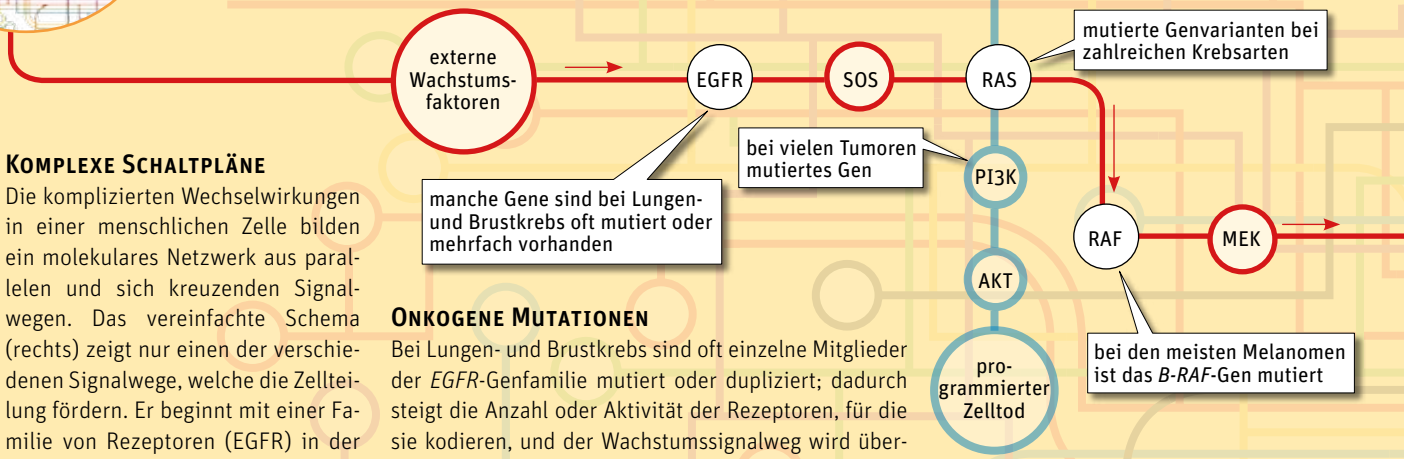
SLIM FILMS

Zahlreiche Signalwege führen zur Entartung



Infolge fehlerhaft funktionierender Gene verhalten sich Krebszellen abnorm. Da Gene für Proteine kodieren, die als Zellbausteine, Signale und Regulatoren anderer Gene dienen, vermag schon eine Mutation, die bloß ein einzelnes davon lahmlegt oder überaktiviert, die Zelle auf mannigfache Weise zu stören (unten). Allerdings müssen meist onkogene – Krebs fördernde – Mutationen in mehreren Genen zusammenkommen, bevor eine Zelle die typischen Eigenschaften einer bösartigen Tumorzelle zeigt (Kasten rechts).

Die Identifikation sämtlicher Gene, deren Veränderung derartige Eigenschaften hervorrufen kann, sollte eines Tages offenbaren, welche Mutationen der wahre Motor hinter einer bestimmten Krebsart – oder sogar hinter dem Tumor eines bestimmten Patienten – sind und wie die Krankheit am besten zu bekämpfen ist.



Komplexe Schaltpläne

Die komplizierten Wechselwirkungen in einer menschlichen Zelle bilden ein molekulares Netzwerk aus parallelen und sich kreuzenden Signalwegen. Das vereinfachte Schema (rechts) zeigt nur einen der verschiedenen Signalwege, welche die Zellteilung fördern. Er beginnt mit einer Familie von Rezeptoren (EGFR) in der Zellmembran. Werden sie durch externe Wachstumsfaktoren stimuliert, so geben sie der Zelle über Kaskaden weiterer Proteine und Gene das Signal zur Zellteilung.

Onkogene Mutationen

Bei Lungen- und Brustkrebs sind oft einzelne Mitglieder der *EGFR*-Genfamilie mutiert oder dupliziert; dadurch steigt die Anzahl oder Aktivität der Rezeptoren, für die sie kodieren, und der Wachstumssignalweg wird überstimuliert. Das kann auch durch Fehler bei weiteren Instanzen der Kaskade geschehen. Defekte des *B-RAF*-Gens beispielsweise, wie sie bei rund 70 Prozent der Melanome auftreten, lösen eine übermäßige Zellvermehrung aus. Versionen des *RAS*-Gens sind bei vielen Krebsarten mutiert; das beeinflusst nicht nur das Zellwachstum, sondern auch andere Signalwege – zum Beispiel einen, der geschädigte Zellen normalerweise zur Selbstauflösung treibt.

LUCY READING-IKKANDA, NACH: MASSACHUSETTS GENERAL HOSPITAL CANCER CENTER, BOSTON, UND NACH: DAPHNE W. BELL, NHGRI/NIH CANCER GENETICS BRANCH, BETHESDA

In Kürze

- **Die Bösartigkeit der Tumorzellen** beruht auf der veränderten Struktur oder Aktivität von Genen.
- **Die Identifikation von Genen**, die an bestimmten Krebsarten beteiligt sind, fördert schon heute Diagnose und Therapie.
- **Der Krebsgenomatlas** ist ein groß angelegtes Projekt, das alle Mutationen bei unterschiedlichen Krebsarten aufspüren soll, damit entscheidende Veränderungen auf Gen- oder Proteinebene gezielt behandelt werden können.

projekts starteten die US-amerikanischen Nationalen Gesundheitsinstitute (*National Institutes of Health*, NIH) die Pilotphase des Großprojekts »The Cancer Genome Atlas« (TCGA) mit dem Ziel, einen vollständigen Katalog der für Krebs relevanten Genomveränderungen zu erstellen.

Es gibt einen wichtigen Grund, dieses ehrgeizige Unternehmen der biologischen Großforschung energisch voranzutreiben: die enorme Zahl der Krebstoten. Täglich sterben mehr als 1500 US-Amerikaner an Krebs – ein Mensch pro Minute. (In Deutschland gab es im Jahr 2005 rund 217 000 Krebstodesfälle, also 594 pro Tag.) Da das mittlere Alter der Bevölkerung in den Industrieländern zunimmt, werden diese Zahlen in den kommenden Jahrzehnten deutlich ansteigen – es sei denn, Forscher finden neue Angriffspunkte in den Krebszellen und innovative gezielte Waffen dagegen.

Dabei handelt es sich um ein Forschungsvorhaben von kaum vorstellbarem Ausmaß. Angewandt auf die fünfzig häufigsten Krebsarten könnte der Sequenzierungsaufwand am Ende mehr als zehntausend Humangenomprojekten entsprechen. Die kühne Vision muss sich darum einer realistischen Prüfung der wissenschaftlichen Möglichkeiten unterwerfen.

Eine Krankheit der Gene

Die Idee, allen Krebsformen lägen Veränderungen des zellulären Genoms zu Grunde, ist nicht neu. Seit Forscher im Jahr 1981 erstmals ein menschliches Onkogen – eine Krebs fördernde Abart eines Gens – identifizierten, hat sich die Vorstellung durchgesetzt, dass maligne Tumoren hauptsächlich durch Mutationen in bestimmten Genen verursacht werden. Solche Veränderungen entstehen etwa durch Giftstoffe oder schädliche Strahlung, durch schieflaufende DNA-Reparaturprozesse oder durch fehlerhafte DNA-Replikation während der Zellteilung. Nur relativ selten besteht eine bereits von den Eltern geerbte Krebsdisposition.

Diese Mutationen stören wichtige zelluläre Regulationsmechanismen; es kommt zu unkontrollierter Zellvermehrung sowie zu der typischen Tendenz maligner Zellen, in benachbartes Gewebe einzudringen und sich

Charakteristika bösartiger Tumoren

Die folgenden sechs Merkmale verleihen malignen Tumoren ihre tödliche Fähigkeit, ihr Ursprungsgewebe zu überwuchern, daraus auszubrechen und sich im Körper zu verbreiten.

Autonomie der Zellteilungssignale
Tumorzellen verstärken externe Wachstumsstimuli oder erzeugen ihre eigenen Zellteilungssignale.

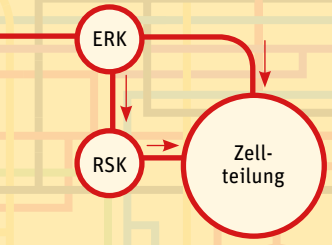
Unempfindlichkeit gegen wachstumshemmende Signale
Krebszellen werden unempfindlich gegen teilungshemmende Signale aus umgebendem Gewebe.

Deaktivierung des programmierten Zelltods
Mechanismen, die eine Selbstzerstörung beschädigter Zellen auslösen sollen, werden ausgeschaltet oder übergangen.

Unbegrenzte Teilungsfähigkeit
Krebszellen verstehen es, die normalerweise begrenzte Anzahl an Zellteilungen zu umgehen.

Neubildung von Blutgefäßen
Tumoren senden Signale zur Bildung neuer Gefäße aus, durch die sie mit Sauerstoff und Nährstoffen versorgt werden.

Invasivität und Beweglichkeit
Krebszellen setzen sich über viele Signale und Kräfte hinweg, die normale Zellen festhalten und daran hindern, in andere Gewebe einzuwandern und sich dort zu vermehren.



Lungenkrebszelle bei der Zellteilung

NACH: DOUGLAS HANAHAN UND ROBERT A. WEINBERG, THE HALLMARKS OF CANCER, CELL 07.01.2000, BD. 100

PHOTO RESEARCHERS INC., STEVE GSCHMEISSNER

WICHTIGE BEGRIFFE

- **Genom:** Gesamtheit aller Gene einer Zelle, vereinfacht Erbgut genannt
- **Sequenzierung:** Entzifferung der Basenabfolge in der DNA
- **Onkogen:** zunächst normales Zellgen, das auf Grund einer Mutation oder Fehlregulation ein überaktives Protein oder zu viel des normalen Proteins erzeugt und das dadurch mit Krebs assoziiert ist
- **Tumorsuppressorgen:** ein Zellgen, das normalerweise Krebswachstum unterdrückt; sein Ausfall fördert Krebs

durch den ganzen Körper auszubreiten. Einige Mutationen schalten Gene aus, die sonst gegen abnormes Zellverhalten schützen, während andere die Aktivität gefährlicher Gene erhöhen. Da meist mehrere dieser Veränderungen nötig sind, bis eine Zelle sich in eine Krebszelle verwandelt, dauert es oft Jahre, bis ein bösartiger Tumor entsteht.

In den letzten beiden Jahrzehnten haben zahlreiche Forschergruppen mit neuen molekularbiologischen Verfahren nach verdächtigen Mutationen gesucht. Dabei wurden rund 350 krebsassoziierte Gene identifiziert. Eine Datenbank namens Cosmic (für *catalogue of somatic mutations in cancer*) wird von der Gruppe um Michael Stratton am Wellcome-Trust-Sanger-Institut im britischen Cambridge unterhalten. Doch niemand glaubt, das sei die komplette Liste.

Hat es Sinn, die genomische Grundlage von malignen Tumoren weiterhin quasi in Heimarbeit zu untersuchen, wenn wir jetzt die Mittel besitzen, Umfang und Tempo der Entdeckungen sehr stark zu beschleunigen? Viele führende Krebsforscher und Molekularbiologen sind überzeugt, es sei Zeit für eine systematische, gemeinsame und umfassende Erforschung der Krebsgenomik.

Indem das Humangenomprojekt eine standardisierte Referenzsequenz aller drei Milliarden DNA-Basenpaare des normalen menschlichen Genoms erarbeitete, schuf es eine solide Grundlage für das neue TCGA-Projekt und dient mit seiner internationalen Zusammenarbeit zugleich als Vorbild. Nun gilt es, die DNA-Sequenz und andere Charakteristika normaler Zellgenome mit denen von Krebszellen zu vergleichen (siehe Kasten oben). Das Humangenomprojekt brachte Sequenzierungstechnik und Genomanalyse enorm voran. An seinem Beginn im Jahr 1990 kostete die Sequenzierung – die Entzifferung einer Basenabfolge – mehr als zehn US-Dollar pro endgültig bestätigter Nukleotidbase. Heute liegen die Kosten bei weniger als einem Cent pro Base, und sie werden vermutlich mit der Entwicklung neuartiger Methoden weiter fallen (siehe »Das Projekt persönliches Genom« von George M. Church, Spektrum der Wissenschaft 6/2006, S. 30). Zudem kommen weitere nützliche technologische Entwicklungen hinzu. Deshalb erscheint für den

Gene und Krebs

Einen Zusammenhang zwischen einer Abnormität des Erbguts und der Entartung von Tumorzellen vermutete unter anderem der deutsche Biologe Theodor Boveri schon vor hundert Jahren. Doch erst in den letzten Jahrzehnten häuften sich die Indizien, dass Mutationen in Genen direkt das unbotmäßige Verhalten von Krebszellen verursachen. Im Jahr 1986 kam die Idee auf, das normale menschliche Genom zu sequenzieren, um auch maligne Genveränderungen umfassend zu untersuchen. Das Humangenomprojekt wurde 2003 abgeschlossen. Das Krebsgenomatlas-Projekt soll nun mit der Katalogisierung von Genmutationen bei drei menschlichen Tumorarten beginnen.

1890 – 1914

Abnorme Chromosomenverteilung während der Zellteilung legt einen Zusammenhang mit Bösartigkeit nahe.

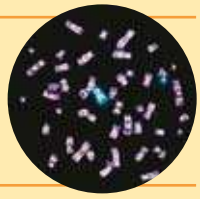
Theodor Boveri

1950 – 1960

Mehrfach wird nachgewiesen: Verschiedene Tumorviren können durch Übertragen ihrer Gene in die Wirtszelle Krebs erzeugen.

1960

Mit der Entdeckung des so genannten Philadelphia-Chromosoms wird erstmals ein genetischer Defekt einer bestimmten Krebsart zugeordnet, der chronischen myeloischen Leukämie (CML).



1976

Bei tierischen Zellen wird erkannt, dass deren eigenes Gen *src* Krebs verursachen kann.

1979

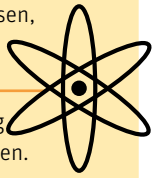
Das *P53*-Gen wird entdeckt. Später zeigt sich: Es ist das bei menschlichen Tumoren am häufigsten mutierte Gen.

1981

Mit *H-RAS* wird das erste humane Onkogen identifiziert: ein Gen, dessen Mutation beim Menschen Krebs fördern kann.

1983

In Tumorzellen wird eine veränderte DNA-Methylierung nachgewiesen, von der man vermutet, dass sie die Genaktivierung beeinflusst.



1986

Renato Dulbecco ruft in der Zeitschrift »Science« zur Sequenzierung des Humangenoms auf, um damit die Krebsforschung voranzubringen.

1986

Das US-Energieministerium erwägt, das Humangenom zu sequenzieren, um die Wirkung radioaktiver Strahlung zu erforschen.

1986

Das erste Tumorsuppressorgen, *RB1*, wird identifiziert.

1987

Das Fusionsgen *BCR-ABL* auf dem Philadelphia-Chromosom wird als Auslöser von CML erkannt.

1990

Das Mehrschrittmodell der Tumorentstehung erklärt, wie eine Zelle durch mehrere, sich anhäufende Genveränderungen bösartig werden kann.

1990

Das Humangenomprojekt beginnt.

OBEN: 1: BOVERI: PHOTO RESEACHERS INC.; 2: PHILADELPHIA CHROMOSOM: DEPT. OF CLINICAL CYTOGENETICS, ADDENBROOKE HOSPITAL; UNTEN: TUMORZELLE: PHOTO RESEARCHERS INC., STEVE GSCHMEISSNER

angestrebten Atlas die Sequenzierung im Großmaßstab – noch vor wenigen Jahren undenkbar – als der wohl effektivste und kostengünstigste Weg, um die Vielfalt der bei Krebs beteiligten genomischen Faktoren zu identifizieren.

Riesige Datenmengen sind natürlich wenig wert, wenn sie letztlich den Patienten nicht wirklich helfen. Wie sich zeigt, vermag das Aufspüren spezifischer Genveränderungen in Krebszellen tatsächlich den Weg zu einer besseren Diagnose, Behandlung und Vorbeugung von Tumorerkrankungen zu ebnen. Diese ermutigenden Anfänge, welche die Richtigkeit des Grundkonzeptes belegen, verdeutlichen aber auch, warum die weiteren Schritte kompliziert, zeitaufwändig und teuer sein werden.

Mutationen bei bösartigen Melanomen

Im Jahr 2001 begann das Wellcome-Trust-Sanger-Institut probeweise, mit Robotern und Datenverarbeitungssystemen 20 Gene in 378 Tumorgewebeproben zu sequenzieren. Hier ging es zunächst um technische Optimierung. Ein Jahr später machte die Gruppe dabei eine äußerst interessante Entdeckung: Bei rund 70 Prozent der untersuchten bösartigen Melanome war ein Gen namens *B-RAF* mutiert. Gleich nahmen mehrere Forscher diesen möglichen Therapieansatz gegen den hochgefährlichen Schwarzen Hautkrebs unter die Lupe. Sie testeten verschiedenste Substanzen – von klassischen Medikamenten bis zu kurzen interferierenden Ribonukleinsäuren – in Zelllinien und in Mäusen, um damit die Aktivität des Gens zu blockieren oder ein Protein namens MEK zu hemmen, das infolge der *B-RAF*-Mutationen überproduziert wird. Nur sechs Jahre später werden die aussichtsreichsten dieser neuen Therapieformen schon in klinischen Studien getestet.

Andere Forschergruppen untersuchen bereits Genmutationen, die mit bestimmten Formen von Brustkrebs, Darmkrebs, Leukämien, Lymphomen und anderen zusammenhängen, um molekulare Diagnosetechniken und prognostische Tests für optimal auf den einzelnen Patienten zugeschnittene Chemotherapien zu entwickeln. Die Krebsgenomik hat aber auch mitgeholfen, einige völlig neue Therapien zu entwickeln und einzusetzen.

Zum Beispiel wurde der Wirkstoff Imatinib (Handelsname Glivec) maßgeschneidert als Hemmstoff gegen ein Enzym konzipiert, das durch die mutationsbedingte Fusion zweier Gene (*BCR-ABL*) entsteht und chronische myeloische Leukämie verursacht. Imatinib erzielt nicht nur dramatische Therapieerfolge

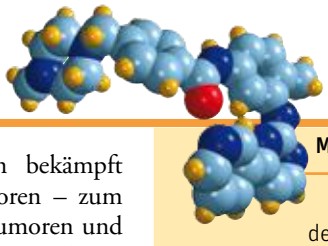
bei dieser Erkrankung, sondern bekämpft auch genetisch komplexere Tumoren – zum Beispiel gastrointestinale Stromatumoren und andere relativ seltene Krebsarten, an denen ähnliche Enzyme beteiligt sind. Herceptin, ein Hemmstoff des zellulären Signalrezeptors HER2, dient zur Therapie von Brustkrebsformen, bei denen eine abnorme Vervielfachung des zugehörigen Gens zu einer Überproduktion dieses Rezeptorproteins führt.

Bei welchen spezifischen Genmutationen im Tumor ein Patient von einem Mittel profitieren kann, prüfen derzeit auch Studien für die Wirkstoffe Gefitinib (Iressa) und Erlotinib (Tarceva) gegen Lungenkrebs sowie für Bevacizumab (Avastin) gegen Lungenkrebs, Darmkrebs und andere Tumorarten. Die Leistungsfähigkeit der neuen genbasierten Möglichkeiten zur Diagnose, Prognose und Therapie ist gewiss erfreulich, aber die Liste wäre viel länger, wenn Universitäten und Unternehmen bereits Zugang zum kompletten Krebsgenomatlas hätten.

Eine Studie unter Federführung von Wissenschaftlern der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (US-Bundesstaat Maryland) illustriert, wie wirksam eine groß angelegte Genomik Krebsgene zu identifizieren vermag – zugleich aber auch, welch ungeheuren Aufwand ein vollständiger Atlas erfordern wird. Die Arbeitsgruppe sequenzierte rund 13 000 Gene aus Tumorgewebe von elf Patienten mit Darmkrebs und elf Patientinnen mit Brustkrebs – und fand verdächtige Mutationen in insgesamt fast zweihundert verschiedenen Genen. Interessanterweise war zuvor nur ein Dutzend dieser Gene mit den beiden Tumorarten in Verbindung gebracht worden, und die meisten Wissenschaftler hätten nur wenig mehr erwartet.

Eine der größten Schwierigkeiten bei solchen Unterfangen ist das Aussondern bedeutungsloser Mutationen in den Proben. Überraschenderweise fanden erste Sequenzierungsstudien kaum gleichartige Mutationen zwischen verschiedenen Tumorarten, dafür aber erhebliche Unterschiede in den Mutationsmustern bei Patienten mit derselben Krankheit. Offenbar vermögen viele unterschiedliche Kombinationen von Mutationen eine normale Zelle in eine Krebszelle umzuwandeln. Selbst bei Erkrankungen des gleichen Organs oder Gewebes treten deshalb im genetischen Profil der Tumoren von Patient zu Patient große Unterschiede auf.

Um das ganze Ausmaß des TCGA-Projekts zu verstehen, muss man sich die Komplexität vor Augen halten, die bereits die Pilotstudien offenbaren, und sich dann eine Ausweitung



Molekülmodell des Wirkstoffs Imatinib (Glivec)

1993

Beginn der vorklinischen Prüfung von Imatinib (später unter dem Handelsnamen Glivec bekannt), dem ersten therapeutischen Wirkstoff, der gezielt eine genetische Krebsursache bekämpft.

1999

Erstmals werden Genaktivitätsprofile eingesetzt, um zwischen Tumortypen zu unterscheiden und die Wirkung von Chemotherapien vorherzusagen.

2001

Imatinib wird von der US-Arzneimittelbehörde (FDA) zugelassen.

2002

Das Wellcome-Trust-Sanger-Institut entdeckt eine Mutation im *B-RAF*-Gen, die bei 70 Prozent aller Melanome auftritt.

2003

Das Humangenomprojekt wird abgeschlossen.

2005

Die US-Gesundheitsbehörde kündigt das Pilotprojekt für den Krebsgenomatlas (TCGA) an.

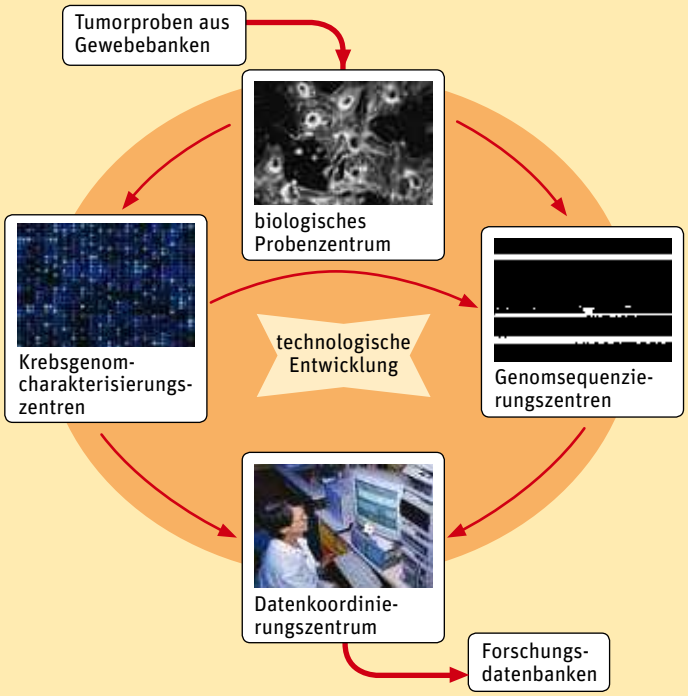
2006

TCGA benennt die Partnerinstitute des Pilotprojekts sowie drei Tumorarten, die sequenziert und genetisch analysiert werden sollen.

2007 – 2010

TCGA sammelt und analysiert Tumorproben, die aus den Gewebebanken ausgewählter onkologischer Therapiezentren stammen. Die vier Hauptkomponenten des Programms – ein biologisches Probenzentrum, sieben Krebsgenomcharakterisierungs- und drei Genomsequenzierungszentren – entwickeln gemeinsam Methoden zur Gewinnung und Verarbeitung von Genomdaten, die einem größeren Kreis von Wissenschaftlern zur Verfügung gestellt werden sollen.

WIE ARBEITET TCGA?



OBEN: GLIVEC-MOLEKÜL: PHOTO RESEARCHERS INC., MARK J. WINTER; UNTEN: 1. BIOLOG. PROBEN: PHOTO RESEARCHERS INC., CECIL H. FOX; 2. GENOMSEQUENZIERUNG: NHGRI; 3. DATENKOORDINIERUNG: CORBIS, CDC/PHIL; 4. KREBSGENOMCHARACTERISIERUNG: AFFYMETRIX

auf mehr als hundert Tumorarten vorstellen. Das verschlägt selbst Veteranen des Humangenomprojekts und erfahrenen Tumorbiologen den Atem. Dennoch machen die TCGA-Teilnehmer und andere Pioniere aus aller Welt weiter, denn wir sind überzeugt, dass sich im Irrgarten des Krebsgenoms größte Chancen für lebensrettende Therapien verbergen.

Karte eines kolossalen Kontinents

Auch wenn bis zu einem kompletten Katalog viele Jahre vergehen mögen, werden wahrscheinlich schon auf dem Weg dorthin Ergebnisse anfallen, welche die Krebsbehandlung revolutionieren könnten; das hat die bisherige Erfahrung aus den Vorstudien gezeigt. Mit jeder neu in das Projekt aufgenommenen Krebsart werden die Forscher viele neue Angriffspunkte für maßgeschneiderte Behandlungsmethoden gewinnen.

Schon zu Beginn des Humangenomprojekts hat es sich bewährt, Protokolle und Technologie schrittweise zu erproben und erst dann in die Massenproduktion von Sequenzdaten einzusteigen. Ebenso fängt das TCGA-Programm mit einem Pilotprojekt an, um den wissenschaftlichen Rahmen zu entwickeln und zu testen.

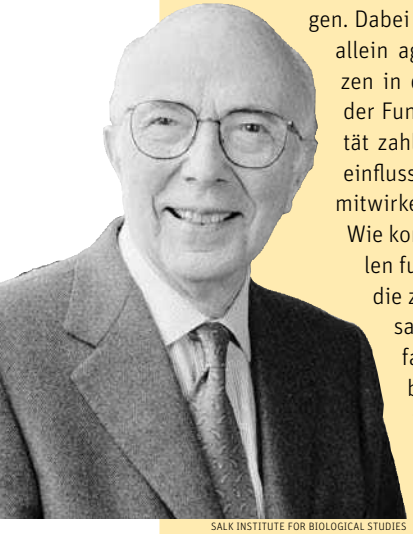
Im Jahr 2006 wählten das National Cancer Institute und das National Human Genome Research Institute die Teams und Institutionen für diese Pilotphase aus sowie die Krebsarten, die zunächst untersucht werden sollen. In den nächsten drei Jahren werden die beiden Institute hundert Millionen US-Dollar für einen Atlas der Genomveränderungen bei drei Tumortypen aufwenden: bösartige Hirntumoren (Glioblastome), Lungenkrebs und Eierstockkrebs. Diese Typen wurden unter anderem ausgewählt, um die Erfolgsaussichten einer Ausweitung auf viel mehr Tumorarten abzuschätzen. Denn nur wenn die Pilotphase ihre Ziele erreicht, wird die NIH das Gesamtprojekt unterstützen.

Die Zeit ist reif!

Von Renato Dulbecco

Als ich 1986 ein Projekt vorschlug, das alle menschlichen Gene identifizieren sollte, war mein wichtigstes Anliegen, die an der Entstehung von Krebs beteiligten Gene zu finden. Ich erhoffte mir davon neue Werkzeuge für die Forschung und letztlich für neue Therapien. Das Humangenomprojekt ist inzwischen abgeschlossen und hat sich als zweckmäßig zur Identifikation von Genen erwiesen, die bei vielen Krankheiten eine Rolle spielen – auch bei Krebs. Außerdem wird die Genomsequenzierung auf andere Organismen – von Bakterien bis zu Schimpansen – angewandt und zeigt die Einheit der belebten Welt: Selbst weitläufig verwandte Lebewesen haben zahlreiche Gene gemeinsam.

Auf Grund dieser Arbeit ermöglichen neue Techniken ein viel besseres Verständnis für die komplizierten Prozesse, mit denen Gene eine Vielzahl funktioneller Moleküle hervorbringen. Dabei wurde erkannt, dass Gene nicht für sich allein agieren, sondern zu umfangreichen Netzen in der Zelle gehören. Jede Veränderung in der Funktion eines Gens kann daher die Aktivität zahlreicher anderer Gene und Proteine beeinflussen, die an der Selbsterhaltung der Zelle mitwirken.



SALK INSTITUTE FOR BIOLOGICAL STUDIES

Wie kompliziert dieses System in normalen Zellen funktioniert, erweist sich, wenn bei Krebs die zelluläre Selbstkontrolle schrittweise zusammenbricht. Dieser fortschreitende Verfall wird nur zum Teil von der Mutation bestimmter Gene verursacht; größtenteils ist er das Ergebnis der dadurch veränderten Aktivität vieler anderer Gene, die an der Zellsteuerung mitwirken. Einzelne Gene können somit für das Auslösen von Krebs (die Initiation) verantwortlich sein und daher therapeutische Ansatzpunkte darstellen. Um die weiter fortgeschrittenen Stadien der Erkrankung – etwa die akute Phase einer myeloischen Leukämie oder die Metastasenbildung von Tumoren – zu bekämpfen, müssen viele anderer Gene einbezogen werden. Die meisten davon sind noch unbekannt.

Eine Ausnahme ist die jüngst entdeckte Onkogenabhängigkeit bestimmter Tumorzellen: Obwohl im Genom zahlreiche Mutationen vorhanden sind, führt schon die Deaktivierung eines einzelnen Onkogens zur Apoptose – zum Selbstmord der Zelle. Um zu klären, wie verbreitet dieses Phänomen ist, brauchen wir einen Katalog aller strukturellen und funktionellen Genveränderungen, die bei Krebszellen zum Verlust der Selbstkontrolle führen. Das wiederum erfordert die komplette Bestimmung der Regulationsnetze mittels Computer – eine Aufgabe für die Zukunft.

Doch auf dem Weg zu diesem Ziel können die Forscher viele andere offene Fragen klären. Zum Beispiel gibt es interessante Ähnlichkeiten im Verhalten von Stamm- und Krebszellen: Beide vermögen sich unbegrenzt zu teilen; beide sind höchst sensitiv für die zelluläre Nische, in der sie wachsen; und beide haben viele aktive Gene gemeinsam.

Die Genomik eröffnet zwar bereits willkommene Einblicke in die Mechanismen der Krebsentstehung, aber noch bleibt das Bild skizzenhaft. Es wird Zeit, einen umfassenden Katalog der an Krebs beteiligten Gene zu erstellen – unter Einsatz aller Mittel der Genomik und Molekularbiologie. Der Krebsgenomatlas hat genau dies zum Ziel.

Renato Dulbecco *ist emeritierter Präsident des Salk-Instituts in San Diego (Kalifornien). Er erhielt 1975 – zusammen mit Howard Temin und David Baltimore – den Medizin-Nobelpreis für Entdeckungen zur Wechselwirkung zwischen Tumorviren und dem Erbmaterial der Zelle.*

An den drei gewählten Krebsarten erkranken in den USA jährlich insgesamt 210 000 Menschen, und im Jahr 2006 starben 191 000 daran. (In Deutschland trifft es rund 62 000 Personen pro Jahr, knapp 50 000 Todesfälle im Jahr 2003 gingen darauf zurück.) Für diese drei existieren zudem Sammlungen von Gewebeproben, die den strengen wissenschaftlichen, technischen und ethischen Anforderungen des Projekts entsprechen. Im September 2006 wählten unsere Institute drei Gewebebanken aus, die solche Proben liefern sollen sowie bei Bedarf neue Tumorgewebe und Normalgewebe derselben Patienten zum Vergleich. Diese Banken werden das Material an ein zentrales Probenzentrum *(Biospecimen Core Resource)* liefern – eine von vier Hauptkomponenten des TCGA-Pilotprojekts.

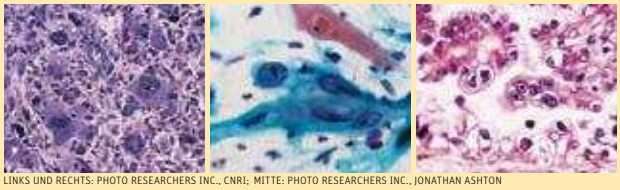
Die anderen drei Hauptelemente sind die Krebsgenomcharakterisierungs- und Genomsequenzierungszentren sowie ein Datenkoordinationszentrum (siehe Kasten S. 45). All diese Gruppen werden zusammenarbeiten und offen Daten austauschen. Insbesondere werden die sieben Krebsgenomcharakterisierungszentren mit unterschiedlichen Techniken das Aktivitätsprofil von Genen in Tumorproben untersuchen und großräumige Genomveränderungen (im Gegensatz zu eher punktuellen Mutationen) katalogisieren, die zur anfänglichen Entwicklung und zum Fortschreiten von Krebs beitragen. Zu solchen Veränderungen zählen Chromosom-Umordnungen, Vervielfachungen von Genen sowie epigenetische Veränderungen – das heißt chemische Modifikationen der DNA, welche Gene aktivieren oder deaktivieren, ohne die Basenabfolge anzutasten.

Werden Gene und andere Chromosomenbereiche von den Krebsgenomcharakterisierungszentren als interessant identifiziert, wandern sie zu den drei Genomsequenzierungszentren. Außerdem werden dort krebsverdächtige Genfamilien sequenziert, etwa

Renato Dulbecco:
»Bei Krebs bricht die zelluläre Selbstkontrolle schrittweise zusammen. Dieser Verfall wird nur zum Teil von der Mutation bestimmter Gene verursacht; größtenteils ist er das Ergebnis der dadurch veränderten Aktivität vieler anderer Gene, die an der Zellsteuerung mitwirken«

Genetische Veränderungen in Tumorzellen

Die Arbeitsgruppen des TCGA-Pilotprojekts werden rund 1500 Tumorproben von Patienten mit Lungenkrebs, Eierstockkrebs oder Hirntumor (Glioblastom) auf genetische Veränderungen untersuchen. In jeder Probe sollen etwa 2000 verdächtige Gene sequenziert werden. Die Liste dieser Zielgene wird auf den jeweiligen Krebstyp zugeschnitten – größtenteils mit Hilfe der Krebsgenomcharakterisierungszentren, aber auch auf Grund bereits bekannter Krebsgene.



LINKS UND RECHTS: PHOTO RESEARCHERS INC., CNRI; MITTE: PHOTO RESEARCHERS INC., JONATHAN ASHTON

Gewebeproben von Glioblastom, Lungenkrebs und Eierstockkrebs (von links nach rechts)

Genkategorie	Beispiele
Gene, die wegen ihrer abnormen Struktur oder Aktivität von den Krebsgenomcharakterisierungszentren identifiziert wurden	In einigen Hirntumorzellen ist ein Gen, das für das intrazelluläre Protein NF-KAPPA B kodiert, viel aktiver als in normalem Hirngewebe.
bekannte Onkogene (Gene, deren Überaktivität oder Veränderung zu Krebs führt)	▶ Wachtumsfaktor-Rezeptor-Gene: *HER2* (Brust- und Lungenkrebs), *EGFR* (Lungen- und Darmkrebs) ▶ Signalprotein-Gene: *BCR-ABL* (chronische myeloische Leukämie), *RAS* (viele Krebsarten), *B-RAF* (Hautkrebs) ▶ Regulatoren des programmierten Zelltods: *BCL-3* (Lymphom)
bekannte Tumorsuppressoren (Gene, die in nichtmutierter Form vor zellulärer Entartung schützen)	▶ Regulatoren der Zellteilung: *RB1* (Netzhauttumor) ▶ DNA-Reparaturenzyme: *HNPCC* (Darmkrebs, Gebärmutterschleimhautkrebs) ▶ Auslöser des programmierten Zelltods: *P53* (Lungen-, Darm-, Brustkrebs, Hirntumoren)
Gene, die bekannten Onkogenen oder Tumorsuppressorgenen ähneln oder am selben Signalweg mitwirken	Die Onkogene *HER2* und *EGFR* sind Teile des Signalwegs für den Rezeptor des epidermalen Wachstumsfaktors, an dem mindestens ein halbes Dutzend weiterer krebsverdächtiger Gene beteiligt ist.

solche, die für Enzyme kodieren, welche den Zellteilungszyklus steuern, wie Tyrosinkinasen und Phosphatasen; dabei sucht man nach Punktmutationen oder anderen kleinräumigen Veränderungen der Basenfolge. Derzeit schätzen wir, dass im Lauf des Pilotprojekts rund 2000 Gene – in jeder einzelnen von vermutlich 1500 Tumorproben – entziffert werden. Die genauen Zahlen hängen natürlich von den gelieferten Tumorproben ab und von der Vorauswahl in den Krebsgenomcharakterisierungszentren.

Sowohl die Sequenzierungs- als auch die Genomcharakterisierungsteams, die großenteils auch am Humangenomprojekt teilnahmen, bekommen viel mehr zu tun als bei normaler DNA. Tumorzellen mutieren gewöhnlich besonders schnell, weil ihre Kontroll- und Reparaturmechanismen versagen. In ein und demselben Tumor können daher die Genome von Zelle zu Zelle stark variieren, und die Forscher müssen erst Methoden entwickeln, um das »Signal« einer biologisch bedeutsamen Mutation vom »Rauschen« der erhöhten Mutationsrate zu unterscheiden. Zudem enthalten Tumoren fast immer auch gutartige Zellen, welche die Probe quasi verdünnen. Ist die Tumor-DNA zu heterogen, werden beim Sequenzieren vielleicht entscheidende Mutationen nicht erfasst.

Die Forscher müssen das »Signal« einer biologisch bedeutsamen Mutation aus dem »Rauschen« der bei Krebs generell erhöhten Mutationsrate herausfiltern

Nach dem Vorbild des Humangenomprojekts und medizinischer Genomanalysen wird man all diese Daten der weltweiten Forschergemeinde unverzüglich zur freien Verfügung stellen. Um den Nutzen für Grundlagenforschung und Medizin zu erhöhen, will das TCGA die Sequenzdaten und Genomanalysen mit Informationen über die ursprünglichen Tumoren und den Erkrankungsverlauf der Probenspender verknüpfen. Die Entwicklung der Bioinformatik-Software, die solche Datenfluten sammelt, integriert und analysiert, ohne die Anonymität der Patienten zu verletzen, ist eine weitere Hürde, die noch vor uns liegt.

Weiße Flecken auf der Genkarte

So türmen sich auf unserem Weg wissenschaftliche, technische und politische Hindernisse – bekannte und unbekannte. Viele Fragen sind ungeklärt: Lassen sich neue Sequenzierungsverfahren tatsächlich so rasch großtechnisch umsetzen, dass das Projekt finanzierbar bleibt? Wie schnell können wir die Methoden zur systematischen Erfassung epigenetischer und anderer umfangreicher Genomveränderungen verbessern, die mit Krebs und vor allem der Metastasenbildung zusammenhängen? Wie können wir Bioinformatik-Portale für Biologen, klinische Forscher und nicht zuletzt für Ärzte entwickeln? Wie ist es möglich, geistiges Eigentum zu schützen, ohne Grundlagen- und Therapieforschung zu behindern? Wann wird der US-Kongress endlich Gesetze zum Schutz vor genetischer Diskriminierung beschließen, damit die Erkenntnisse des TCGA-Programms bestmöglichen gesundheitlichen Nutzen entfalten? Die Liste lässt sich verlängern.

Um keine falschen Erwartungen zu wecken: TCGA wird zwar reichlich Stoff für biologische Analysen liefern, aber nur das Fundament und gewiss nicht gleich das ganze Gebäude künftiger Krebsforschung. Zudem werden wir für all das leider Zeit brauchen – während Patienten und ihre Familien dringend auf Hilfe warten. Angesichts der riesigen weißen Flecken auf der Karte der Krebsgenomik mutet unsere Aufgabe verlockend und vermessen zugleich an. Die Öffentlichkeit muss wissen, dass dieses beispiellose Vorhaben Jahre harter Arbeit erfordern wird – und den Einfallsreichtum tausender Wissenschaftler aus vielerlei Disziplinen.

Wohin all diese Mühe führen wird, lässt sich heute nur erahnen. Da geht es uns wie den Forschungsreisenden Meriwether Lewis und William Clark zu Beginn des 19. Jahrhunderts. Sie fuhren 1804 den Missouri flussaufwärts, um den Nordwesten Amerikas zu erschließen. Dabei folgten sie der Order von Präsident Thomas Jefferson, »Messungen von Länge und Breite an allen bemerkenswerten Punkten durchzuführen. … Ihre Beobachtungen sind mit großer Mühe und Genauigkeit vorzunehmen; deutlich einzutragen und verständlich für andere wie für Sie selbst«.

Obwohl Lewis und Clark die ersehnte Wasserstraße quer durch den Kontinent nicht fanden, brachten ihre detaillierten Karten mehr Nutzen, als Jefferson je hätte ahnen können. Für alle heutigen und künftigen Krebspatienten hoffen wir, dass unsere Expedition in die Tumorbiologie des 21. Jahrhunderts Renato Dulbeccos kühnste Träume übertrifft. ◁

Francis S. Collins und **Anna D. Barker** leiten die Krebsgenomatlas-Initiative. Collins ist Direktor des National Human Genome Research Institute und leitete zuvor das Humangenomprojekt bis zur Komplettierung der menschlichen Genomsequenz. Barker ist stellvertretende Direktorin für Advanced Technologies and Strategic Partnerships am National Cancer Institute der USA. Sie leitet Programme zur Arzneimittelentwicklung und biotechnischen Forschung im öffentlichen und privaten Sektor mit dem Schwerpunkt Krebsbekämpfung.

Genome-wide analysis of genetic alterations in acute lymphoblastic leukaemia. Von Charles G. Mullighan et al. in: Nature, Bd. 446, S. 758, 2007

Patterns of somatic mutation in human cancer genomes. Von Christopher Greenman et al. in: Nature, Bd. 446, S. 153, 2007

Bioinformatics approaches in the study of cancer. Von David A. Hanauer et al. in: Current Molecular Medicine, Bd. 7, S. 133, 2007

The consensus coding sequence of human breast and colorectal cancers. Von Tobias Sjöblom et al. in: Science, Bd. 314, S. 268, 2006

The new era in cancer research. Von Harold Varmus in: Science, Bd. 312, S. 1162, 2006

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/905469.

AUF DEN NÄCHSTEN SEITEN FOLGT EIN SONDERTEIL DER GESELLSCHAFT FÜR MEDIZIN ▷

Dank seines Elektrosinns weiß dieser Zitronenhai genau, wie er seine Beute – in dem Fall einen kleinen Fisch – am besten erwischt.

BRANDON COLE

Der sechste Sinn der HAIFISCHE

Ein Hai erkennt mit einem zusätzlichen Sinnesorgan das extrem schwache elektrische Feld eines Beutetiers. Vor allem benutzt er diesen Sensor kurz vor dem Zuschnappen.

Von R. Douglas Fields

Zuerst sehen wir die spitze Flosse, die auf uns zurast – ein drei Meter langer Blauhai hat das Blut gerochen. Mehrere große Haie umzingeln schon unser Spezialboot, die sieben Meter messende »Boston Whaler«. Plötzlich schießt eine blausilberne Schnauze durch die quadratische Öffnung im Deck. »Pass auf!«, schreit Melanie. Instinktiv schrecken wir zurück, obwohl meine Frau und ich wissen, dass uns nichts passieren kann. Der Hai zeigt nur sein mit messerscharfen Zähnen bewehrtes Grinsen und sinkt wieder ins Wasser.

Zwar hatten wir die Haie mit Blut angelockt. Doch nicht diese Reaktion wollten wir erforschen – sie war bestens bekannt. Vielmehr interessierte uns ihr damals noch ziemlich geheimnisvoller »sechster Sinn«. Sinnesphysiologen wussten aus Aquariumsexperimenten zwar schon, dass Haie die äußerst schwachen elektrischen Felder wahrnehmen können, die im Meerwasser von Tieren ausgehen – genauer gesagt von deren Zellen. Aber noch niemand hatte wirklich untersucht, wie diese Knorpelfische ihren ungemein scharfen »Elektrosinn« tatsächlich gebrauchen.

Bis Anfang der 1970er Jahre ahnten Tierforscher jenen feinen Sinn der Haie nicht einmal. Heute können wir seine Funktion ganz gut erklären: Elektrowahrnehmung setzen diese Raubfische zur Futtersuche ein. Ihr sechster Sinn hilft ihnen dabei auch in Umwelten und Situationen, in denen die herkömmlichen Sinne – Sehen, Riechen, Schmecken, Fühlen und Hören – nicht zu gebrauchen sind, etwa in verwirbeltem oder brackigem Wasser, bei totaler Finsternis und sogar dann, wenn sich die Beute im Sand versteckt.

Inzwischen erforschen meine Kollegen und ich die molekularen Grundlagen dieser erstaunlichen Fähigkeit. Andere Wissenschaftler untersuchen unter anderem, wie sich das spezielle Sinnesorgan bei der Keimesentwicklung heranbildet. Systematiker wollen herausfinden, welche heutigen und früheren Fische es besitzen beziehungsweise besaßen. Interessant zu erfahren wäre etwa, ob auch die Vorfahren der Landwirbeltiere über einen Elektrosinn verfügten. Von jenen Zusammenhängen wissen wir meist noch nicht besonders viel. In diesem Artikel möchte ich die wenig bekannte Entdeckungsgeschichte der Elektrorezeption bei Haien erzählen. Anschließend berichte ich von eigenen Studien dazu, wie dieser Sinn den Tieren beim Beutemachen hilft.

Als hätten Haie Bartstoppeln

Schon im Jahr 1678 beschrieb der italienische Anatom Stefano Lorenzini die vielen winzigen Poren, die bei Haien und Rochen vorn am Kopf, vor allem um das Maul herum, sitzen, was fast so aussieht, als wären die Fische schlecht rasiert. Er entfernte die Haut an diesen Stellen und fand unter jeder Pore eine kleine durchsichtige Röhre, die ein kristallines Gel enthielt. Manche dieser Röhrchen wirkten dünn und zart. Andere waren fast so dick wie Spagetti und durchaus etliche Zentimeter lang. Tief im Kopf vereinten sich diese Röhren zu mehreren großen, klaren Gallertmassen. Seine erste Idee, dass es sich um Drüsen für Körperschleim handeln könnte, verwarf Lorenzini wieder. Zwar spekulierte er später über eine »mehr versteckte Funktion«. Doch wozu die »Lorenzinischen Ampullen«, wie sie heute heißen, gut sind, blieb noch einige Jahrhunderte im Dunkeln.

Der Lösung kamen Physiologen erst ab der Mitte des 19. Jahrhunderts schrittweise näher – seit sie die Bedeutung des so genannten Seitenlinienorgans von Fischen und Amphibien erforschen. Viele Tiere aus beiden

In Kürze

- **Haie spüren** die äußerst schwachen elektrischen Felder, von denen Tiere im Wasser umgeben sind.
- **Sie messen diese** mit besonderen Sinnesorganen am Kopf, den Lorenzinischen Ampullen – benannt nach einem italienischen Anato-men, der diese Gebilde im 17. Jahrhundert erstmals beschrieb.
- **Ihren sechsten Sinn** benutzen Haie in der Schlussphase eines Angriffs auf Beute. Er sagt ihnen, wo genau sie zubeißen sollten.

Wurden die Lorenzinischen Ampullen gereizt, feuerten die Sinnesnerven je nach Reiz schneller oder langsamer als sonst

Gruppen tragen entlang der Körperseite eine feine Linie, die sich äußerlich sichtbar von den Kiemen zum Schwanz zieht. In seinem inneren Aufbau ähnelt dieses Organ in manchem dem Röhrensystem der Haie, das Lorenzini beschrieben hatte. Es handelt sich um ein spezielles Sinnessystem, einen regelrechten Ferntastsinn, mit dem Fische und Amphibien selbst geringe Wasserbewegungen genauestens spüren. Sie bemerken damit Wasserdruckwellen und Strömungsänderungen, wie sie etwa Hindernisse, mögliche Beute oder sich nähernde Raubfische erzeugen.

Beim Seitenliniensystem der Fische liegt unter einer Linie perforierter Schuppen ein Kanal mit darin aufgereihten Sinnesknospen. Das sind Gallertkappen, die durch Wasserbewegungen verschoben werden. In ihre Basis ragen feine Haarsinneszellen. Schwimmt in der Nähe ein anderer Fisch vorbei, werden die Haarzellen abgelenkt – etwa so, als ob ein Kornfeld im Wind wogt. Nervenzellen erfassen den Vorgang. Sie melden dem Gehirn Stärke und Richtung der Wasserbewegung.

Erst mit den besseren Mikroskopen des späten 19. Jahrhunderts konnten Forscher zeigen, dass auch die von Lorenzini beschriebenen Strukturen in der Haischnauze offenbar für irgendwelche Sinneswahrnehmungen gut sind. Nun war zu erkennen, dass jedes Röhrchen in eine breite Aussackung mündet. Bei jeder solchen »Ampulle« tritt ein feiner Nerv aus, der sich mit dem vorderen Seitenliniennerv vereint (siehe Kasten unten). Die Wissenschaftler konnten die Nervenfasern bis zur Schädelbasis verfolgen, wo sie im oberen Bereich des verlängerten Rückenmarks ins Gehirn ziehen – ein üblicher Weg für Nerven, die Sinnesinformation überbringen. Die Forscher fanden auch winzige Haarzellen ähnlich denen im Seitenlinienorgan. Trotzdem blieb noch lange völlig rätselhaft, für welche Art von Wahrnehmung diese Strukturen zuständig sind.

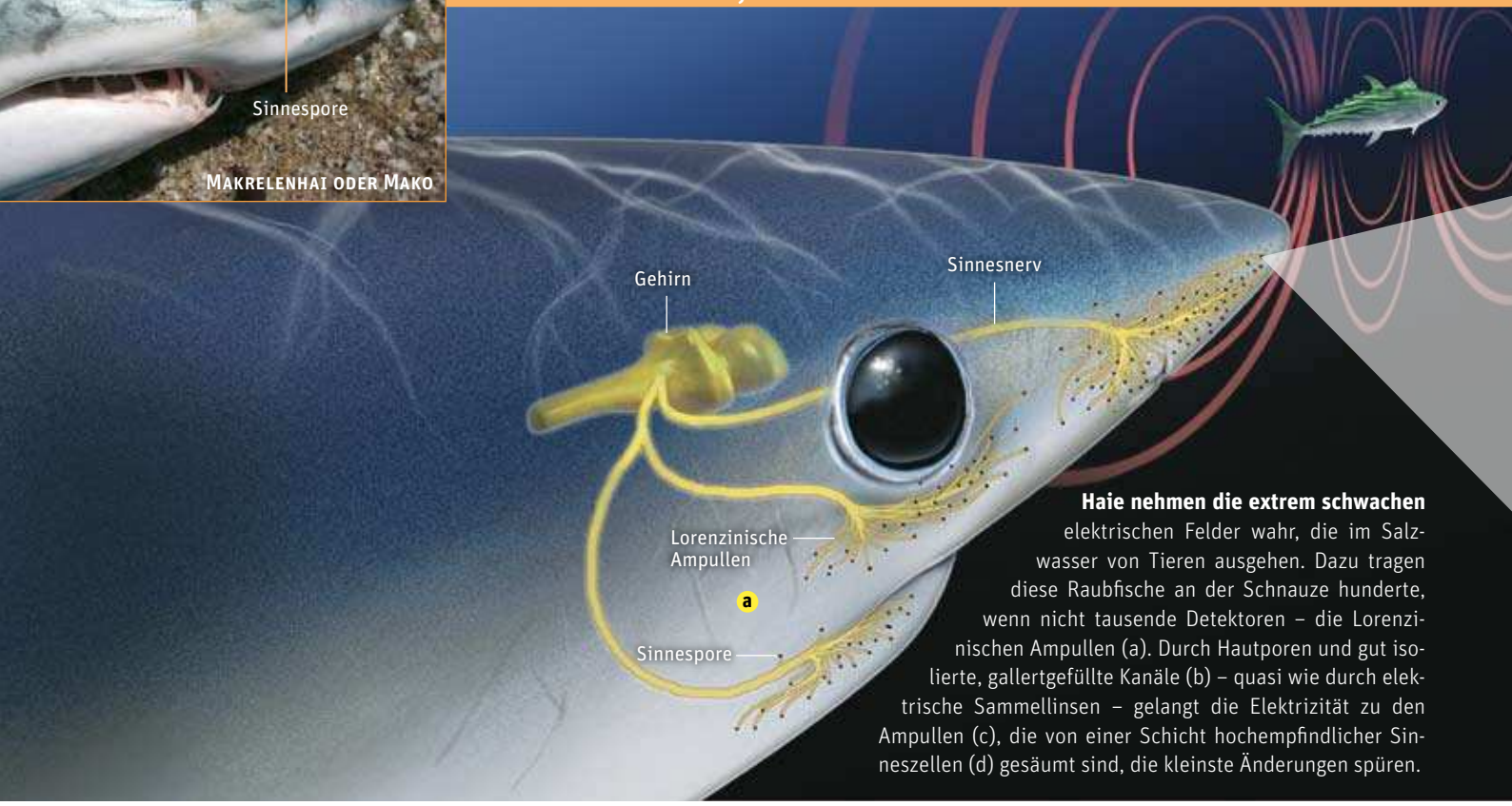
Frühe Irrtümer der Forscher

Dem Zoologen George Howard Parker von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) gelang es im Jahr 1909 zwar zu zeigen, dass ein Hai auch dann noch auf leichte Berührungen der Ampullen an der Schnauze reagiert, wenn man alle Tastrezeptoren in der Haut rundherum ausgeschaltet hat. Was das bedeutete, konnte er jedoch nicht herausfinden. Er überlegte, ob die Fische mit dem Organ eine Wasserbewegung oder einen leichten Wasserdruck wahrnahmen. Allerdings – wenn wir zum Beispiel einen Schlag aufs Auge spüren, schließen wir es im Reflex, obwohl er zu diesem Zweck nicht entstanden ist.

FOTO UND ILLUSTRATION: AMADEO BACHAR

MAKRELENHAI ODER MAKO

Ein Sinnesorgan, das Elektrizität misst



Haie nehmen die extrem schwachen elektrischen Felder wahr, die im Salzwasser von Tieren ausgehen. Dazu tragen diese Raubfische an der Schnauze hunderte, wenn nicht tausende Detektoren – die Lorenzinischen Ampullen (a). Durch Hautporen und gut isolierte, gallertgefüllte Kanäle (b) – quasi wie durch elektrische Sammellinsen – gelangt die Elektrizität zu den Ampullen (c), die von einer Schicht hochempfindlicher Sinneszellen (d) gesäumt sind, die kleinste Änderungen spüren.

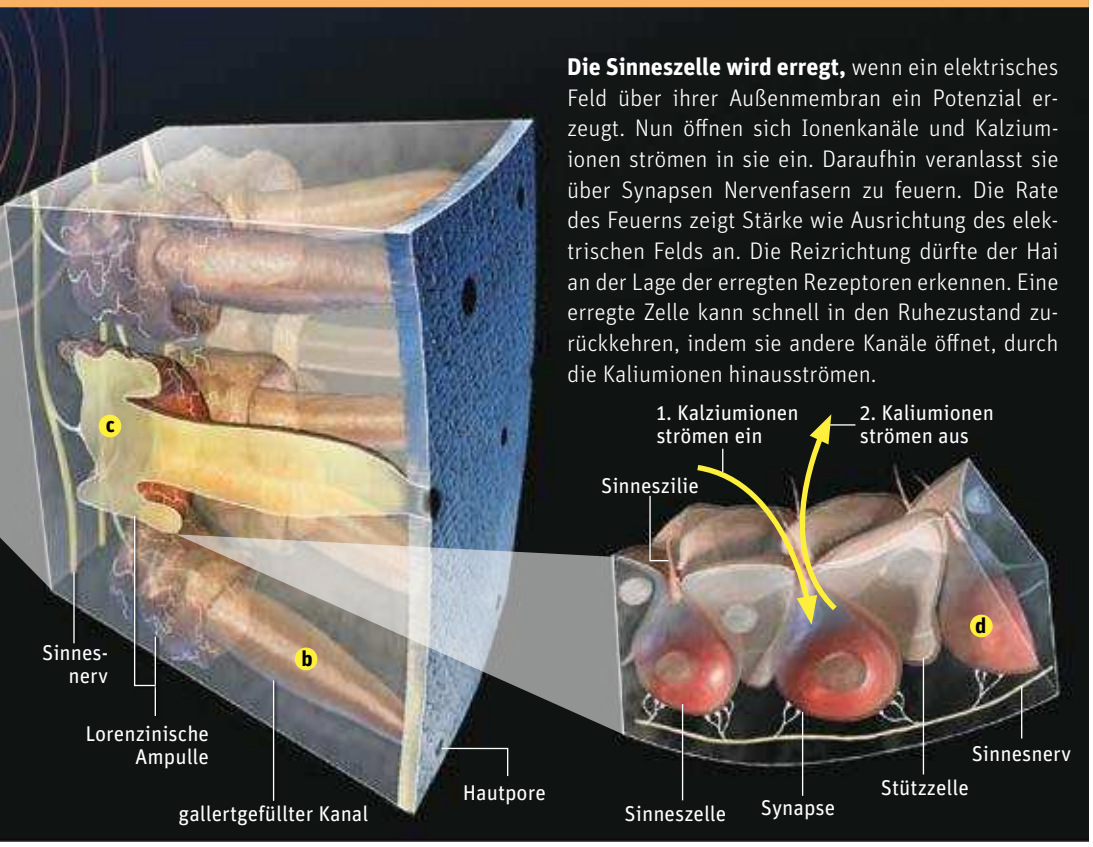
Erst die Erfindung von elektronischen Verstärkerröhren Anfang des 20. Jahrhunderts machte es Sinnesphysiologen endlich möglich, an Sinnesnerven die winzigen elektrischen Signale zu erfassen, die Sinnesorgane zum Gehirn schicken. Im Jahr 1938 gelang es Alexander Sand von der Meeresbiologischen Gesellschaft in Plymouth (England), auch jene Nervenimpulse zu verstärken und aufzuzeichnen, die von den Lorenzinischen Ampullen ausgehen. Sand bemerkte dabei, dass über die Nerven fortwährend in gleichmäßigen Abständen neuronale Impulse liefen, wenn er die Ampullen in Ruhe ließ.

Doch sobald der Wissenschaftler diese Strukturen reizte, kamen die Signale plötzlich schneller beziehungsweise langsamer, je nach Reizeinfluss. Und zwar änderte sich die Impulsrate sowohl auf Berührung und Druck als auch bei einem Kältereiz. Die Ampullen reagierten noch auf Temperaturunterschiede von 0,2 Grad Celsius. Da sich Fische in vielem nach Temperaturgradienten richten, zum Beispiel auch auf ihren Wanderungen, schien die Funktion der Lorenzinischen Ampullen gefunden zu sein: Sie mussten wohl hochempfindliche Organe zur Wärmemessung darstellen.

Die Experimente Sands wiederholte der Sinnesphysiologe R. W. Murray an der Universität Birmingham (England) in den frühen 1960er Jahren mit der modernsten elektrophysiologischen Technik. Dass die Lorenzinischen Ampullen auf Temperaturänderungen, Berührung und Druckunterschiede ansprechen, fand er dabei bestätigt. Zusätzlich verzeichnete er jedoch, dass sie auf leichte Änderungen im Salzgehalt des Wassers reagieren.

Einmal schaltete Murray zufällig über einer Pore ein elektrisches Feld an. Auch da änderte sich die Impulsrate des zugehörigen Nervs. Genauere Untersuchungen ergaben dann, dass sich die Entladungsrate nach der Stärke sowie der Polarität des elektrischen Felds richtete. Rückte der positive Pol des Felds dichter zur Pore, so nahm die Feuerrate ab. Kam der negative Pol näher, dann stieg die Aktivität in der Nervenfaser.

Der Forscher staunte über die extreme Empfindlichkeit dieses Sinnesorgans. Bei diesen Versuchen registrierte es noch eine Spannung von einem millionstel Volt, die er über einem Zentimeter Meerwasser anlegte. Spätere Verhaltensstudien und Messungen von Hirnwellen zeigten eine noch viel höhere Sensitivität. Demnach würden Haie es merken, ob eine 1,5-Volt-Batterie an- oder abgeschaltet ist, deren einer Pol im Atlantik vor New York und deren anderer Pol vor Florida einge-



Die Sinneszelle wird erregt, wenn ein elektrisches Feld über ihrer Außenmembran ein Potenzial erzeugt. Nun öffnen sich Ionenkanäle und Kalziumionen strömen in sie ein. Daraufhin veranlasst sie über Synapsen Nervenfasern zu feuern. Die Rate des Feuerns zeigt Stärke wie Ausrichtung des elektrischen Felds an. Die Reizrichtung dürfte der Hai an der Lage der erregten Rezeptoren erkennen. Eine erregte Zelle kann schnell in den Ruhezustand zurückkehren, indem sie andere Kanäle öffnet, durch die Kaliumionen hinausströmen.

FORSCHUNGS-GESCHICHTE

1678: Stefano Lorenzini beschreibt am Kopf von Haien und Rochen Strukturen unbekannter Funktion.

spätes 19. Jahrhundert: Forscher ergründen die Bedeutung des Seitenliniensystems bei Fischen. Mikroskopische Studien verdeutlichen den Aufbau der so genannten Lorenzinischen Ampullen.

1950er Jahre: H. W. Lissmann und andere Forscher entdecken bei Fischen einen neuen Sinn: den Elektrosinn. Sie beschreiben bei schwach elektrischen Fischen ein etwas anderes Sinnesorgan – die tuberösen Elektrorezeptoren, mit denen die Fische auch ihre eigenen Felder wahrnehmen.

frühe 1960er Jahre: R. W. Murray erkennt, dass die Lorenzinischen Ampullen auf leichte Änderungen des Salzgehalts im Wasser und auf schwache elektrische Felder ansprechen.

1970er Jahre: Adrianus Kalmijn weist die elektrischen Felder tierischer Körper im Meerwasser nach. Haie im Aquarium attackieren vergrabene eingeschaltete Elektroden.

Erkenntnisse seit 1990: Ein Elektrosinn kommt bei vielen Fischen und wasserlebenden Amphibien vor. Es ist ein uraltes Sinnessystem der Wirbeltiere.

taucht wäre. Sie erkennen noch eine Spannung von zehn milliardstel Volt auf einen Zentimeter.

Somit war endlich klar: Die Lorenzinischen Ampullen an der Schnauze von Haien und Rochen dienen offensichtlich der Wahrnehmung sehr schwacher elektrischer Felder und deren Veränderung. Darin sind sie im Tierreich unübertroffen. Bis heute kennen wir kein anderes Organ oder Gewebe, das für diese Reizqualität so besonders empfindlich ist. Dem Menschen fällt es sogar mit modernster Technik schwer, dermaßen schwache elektrische Felder im Meerwasser überhaupt zu messen.

Doch wozu brauchen Haie einen so extrem sensiblen Elektrosinn? Die Forscher wussten zu der Zeit schon, dass manche Fische mit speziellen Strukturen selbst elektrische Felder erzeugen – was Haie allerdings nicht tun. Beispielsweise betäubt der Zitteraal seine Beute mit starken Stromstößen, die er mit einem speziellen Organ hervorbringt, das fast seinen ganzen Körper durchzieht. Viele andere ebenfalls so genannte elektrische Fische produzieren aber nur ganz schwache Stromstöße. Andere Tiere können sie damit nicht erlegen. Schon Charles Darwin hatte in seinem Hauptwerk »Über den Ursprung der Arten« gerätselt, wozu dieses Phänomen wohl gut sein könnte und ob es tatsächlich zwecklose Organe gibt.

Hierfür fanden Zoologen in den 1950er Jahren schließlich eine Antwort, unter ihnen H. W. Lissmann von der Universität Cambridge. Sie entdeckten, dass solche Fische das schwache elektrische Feld, das sie selbst erzeugen, auch selbst wahrzunehmen im Stande sind. Dazu verfügen sie über so genannte tuberöse Rezeptoren oder Organe, die völlig anders aussehen als die Lorenzinischen Ampullen. Ersteren fehlt zum einen die feine Röhre, zum anderen sind sie für elektrische Felder lange nicht so empfindlich wie die Ampullenorgane. Doch immerhin zeigte diese Entdeckung, dass manche Fische neben den bekannten fünf Sinnen noch einen Elektrosinn besitzen.

Zusammen dienen die schwachelektrischen Organe und die tuberösen Rezeptoren als Sender und Empfänger zur Navigation und Ortung, vergleichbar einem Radarsystem. Die Fische, die über beides verfügen, leben meist in sehr trüben Gewässern, etwa im schlammigen Amazonas. Viele gehen nachts auf Futtersuche. Objekte im Bereich des selbst erzeugten elektrischen Felds verzerren dieses und werden somit für das Tier wahrnehmbar, identifizierbar und genau lokalisierbar. Weil Haie und Rochen selbst keine Sender für elektrische Felder besitzen, kam den Sinnesphysiologen der Verdacht, die Lorenzinischen Ampullen könnten als Empfängerstrukturen eines besonders empfindlichen, rein passiven Ortungssystems dienen. Aber was orten diese Fische damit? Denn schließlich verfügen sie auch über andere hervorragende Sinnesorgane. Wozu benötigen sie zusätzlich einen feinen Elektrosinn?

Im Prinzip erzeugen viele aktive Organe von potenziellen Beutetieren im Wasser schwache elektrische Pulse – so die Muskeln, das schlagende Herz, auch das Gehirn. Allerdings ergibt das Schwankungen im Millisekundenbereich, zu schnell für die Lorenzinischen Ampullen. Diese scheinen vielmehr dafür gemacht, elektrische Felder zu erfassen, die sich nur langsam ändern, wie etwa bei elektrochemischen (galvanischen) Batterien. Ähnlich solchen Batterien funktionieren aber Zellen. Batterien können Strom liefern, weil zwei Salzlösungen – Elektrolyten – mit unterschiedlichem elektrochemischem Potenzial eine Spannung erzeugen. Auch zwischen Meerwasser und lebenden Zellen besteht eine Spannung, denn die Salzlösungen sind verschieden. Darum stellt ein Fischkörper im Meerwasser eine schwache Batterie dar. Das resultierende Spannungsfeld um den Fisch herum verändert sich zudem, wenn er Wasser durch seine Kiemen pumpt.

Elektrischer Köder für Chimären

Dem Biologen Adrianus Kalmijn, der damals an der Universität Utrecht arbeitete, gelang es in den 1970er Jahren, die ganz schwachen elektrischen Felder um Meerestiere zu messen. Diese Felder bleiben praktisch immer fast gleich stark. Genau für dergleichen schienen die Lorenzinischen Ampullen geeignet zu sein. Kalmijn simulierte dann in Aquarien mittels vergrabener Elektroden Spannungsfelder, wie sie für Beutetiere von Haien typisch sind. Und wirklich ließen sich die Haie davon täuschen. Sobald der Forscher ein solches elektrisches Feld erzeugte, schwammen sie genau zu der betreffenden Stelle hin und versuchten eine Attacke.

Ich selbst führte vor Jahren ganz ähnliche Experimente durch. Allerdings arbeitete ich nicht mit Haien, sondern mit Chimären, auch Seedrachen genannt – eigenartigen Tiefseefischen aus der Gruppe der Knorpelfische, die mit Haien und Rochen nur entfernt verwandt sein dürften (siehe Kasten S. 60).

Wenn ein Experiment im Labor funktioniert, ist damit noch lange nicht erwiesen, wie sich die Tiere in freier Natur verhalten. Es war nicht einfach zu beweisen, ob und wie Haie ihren Elektrosinn wohl im Meer anwenden.

ANDERE FISCHE MIT EINEM SECHSTEN SINN

Eine Reihe anderer Fische verfügt über Elektrorezeptoren vom gleichen Typ wie Haie. Hier einige Beispiele:

Rochen finden Beute durch »passive« Elektroortung.

MINDEN PICTURES, FRED BAVENDAM

Sägefische (Sägerochen) spüren im Sand versteckte Tiere mit ihrer bewegungs- und elektrosensitiven Schnauze auf.

MINDEN PICTURES, NORBERT WU

Zitterrochen betäuben oder töten Tiere zudem mit ihrem elektrischen Organ.

CORBIS, STEPHEN FRINK

Störe suchen ihre Nahrung auf dem Grund.

MINDEN PICTURES / FOTO NATURA, WIL MEINDERTS

Lungenfische leben im oft trüben Süßwasser.

MINDEN PICTURES / AUSCAPE, JEAN-PAUL FERRERO

toyota-prius.de

Der Toyota Prius mit Hybrid-Synergy-Drive®.

Gesamtsieger in der J. D. Power Kundenzufriedenheitsstudie.

HYBRID SYNERGY DRIVE

Mit dem Toyota Prius wird Deutschland ein gutes Stück sauberer. Der erste serienmäßige Hybridantrieb der Welt macht den Prius in der Mittelklasse zum Fahrzeug mit den niedrigsten CO_2-Emissionswerten. Seine Hybrid-Synergy-Drive®-Technologie verbindet einen VVT-i-Benzinmotor mit einem emissionsfreien Elektromotor. Damit ist der Toyota Prius die ideale Kombination aus Fahrleistung, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit. Der Toyota Prius. Die Zukunft atmet auf.

- Kraftstoffverbrauch in l/100 km: außerorts 4,2, innerorts 5,0, kombiniert 4,3. CO_2-Emission kombiniert: 104 g/km.
- Deutschlands Auto mit den höchsten Werten bei der Kundenzufriedenheitsstudie 2007 von J.D. Power and Associates – veröffentlicht in AUTOStraßenverkehr 16/2007.
- Kraftvolle 82 kW (113 PS) mit 478 Nm max. Drehmoment.
- Beim 100.000-km-Dauertest der AUTO BILD (42/06) und auto motor und sport (4/07) mit „sehr gut“ abgeschnitten.
- 8 Jahre Garantie auf alle Hybridkomponenten inkl. der Batterie

Weitere Informationen: 0180/5 35 69 69 (0,14 €/Min. aus dem Festnetz der dt. Telekom, ggf. abweichende Preise aus dem Mobilfunknetz). Abb. zeigt Prius Sol.

JD POWER REPORT 2007 Sieger aller Klassen

Auto Bild

auto motor und sport

engine of the year awards 2007

Nichts ist unmöglich. TOYOTA

Was Chimären fühlen

Chimären – Seedrachen – erspüren ihre Umgebung auch über Elektrowahrnehmung. Der Autor wies das mit Experimenten in einem runden Aquarium nach (Schemazeichnung).

GRAFIK: MELISSA THOMAS; FOTO: MINDEN PICTURES, NORBERT WU

Schon ferne Vorfahren der Haifische müssen einen Elektrosinn gehabt haben. Denn auch entfernte Verwandte unter den Knorpelfischen, die urtümlich anmutenden Chimären, besitzen die Sinnesorgane dazu. Systematiker bezeichnen deren verschiedene Arten insgesamt als Seedrachen, einige zudem als Seekatzen oder Seeratten.

Meine erste Chimäre sah ich Ende der 1970er Jahre auf einem kalifornischen Fischkutter. Das Tier besaß so große Vorderzähne, dass es sein Maul nicht ganz schließen konnte. Mit seinen Riesenaugen und dem dünnen, langen Hinterteil wirkte es reichlich bizarr.

Für die Fischer war der Seedrachen wertlos, so durfte ich ihn mitnehmen. Zwar war er schon tot. Doch immerhin konnte ich ihn anatomisch untersuchen. Unter der Kopfhaut fand ich eine durchscheinende gallertige Masse. Durchleuchtete ich diese schräg mit einer Lampe, erkannte ich eine Menge transparenter, mit Gallerte gefüllter Kanälchen, die zur Hautoberfläche ausstrahlten, wo sie in Hautporen mündeten. Das erinnerte an die Lorenzinischen Ampullen von Haien, deren Funktion als elektrosensitives Sinnesorgan damals schon bekannt war.

Ob diese Strukturen bei Chimären eine ähnliche Funktion erfüllen, wollte ich zunächst an einem lebenden Tier nachweisen. Darum bat ich Fischer der Gegend, falls sie einen Seedrachen fingen, das Tier am Leben zu erhalten. Und wirklich bekam ich eines Morgens einen Anruf, ich könnte eine Seekatze im Hafen abholen. Im Labor hatte ich schon ein Meerwasseraquarium für Studien vorbereitet. Das Behältnis war rund und so eingerichtet, dass ständig eine Strömung herrschte. Von einer Aussparung in der Mitte aus konnte ich das Tier beobachten (siehe Bild).

Am liebsten schwamm die Chimäre gegen die Strömung. So kam mir die Idee für folgendes Experiment: Ich vergrub Elektroden im Sand des Behältnisses. Ab und zu, wenn der Fisch gerade darüber hinwegglitt, schaltete ich ein schwaches elektrisches Feld ein. Gleichzeitig stupste ich das Tier am Kopf mit einem Glasstab an, woraufhin es sofort kehrtmachte, also nun mit der Strömung schwamm.

Doch nicht lange, dann drehte die Seekatze wieder in ihre Lieblingsrichtung gegen die Strömung um. Falls sie den Elektroreiz wahrnahm, so überlegte ich, könnte man sie vielleicht darauf trainieren, ihre bevorzugte Schwimmrichtung auch dann zu verlassen, wenn ich nur die Elektroden einschaltete.

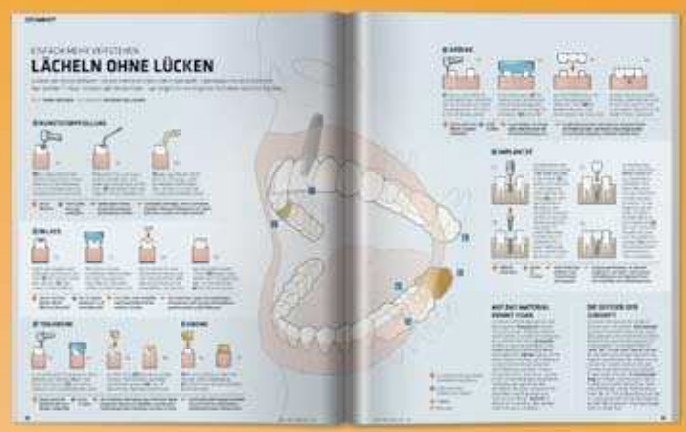
Es dauerte einige Zeit, aber die Chimäre lernte es schließlich wirklich umzukehren, sobald das elektrische Feld auftrat. Von nun an konnte ich diese Reaktion beliebig oft auslösen. Waren die Elektroden dagegen ausgeschaltet, schwamm die Seekatze ohne Weiteres über sie hinweg. Folgende Tests mit verschiedenen Reizstärken und -frequenzen erwiesen, dass dieser Seedrachen genügend empfindliche Elektrosinnesorgane besitzt, um im Meer Fische an deren elektrischem Feld aufzuspüren.

Später brachten David Lange vom Scripps-Institut für Ozeanografie in San Diego (Kalifornien) und ich mit elektrophysiologischen Verfahren auch den Nachweis, dass Chimären für diese Ortung jene Strukturen unter ihrer Kopfhaut benutzen, die so verblüffend den Lorenzinischen Ampullen ähneln. Die Sinnesnerven feuerten bei unterschiedlichen Elektroreizen mit ganz ähnlichen Mustern wie bei Haien. Wie sich später zeigte, gleichen die Sinneszellen auch anatomisch völlig denen der Haie.

Sie möchten mehr WISSEN?

Wie gesund ist Sport wirklich?

Neue Technik-Serie: Das Erfolgsrezept von Apple



Welcher Zahnersatz ist der richtige?

Galerie: Pflanzensamen unter dem Mikroskop

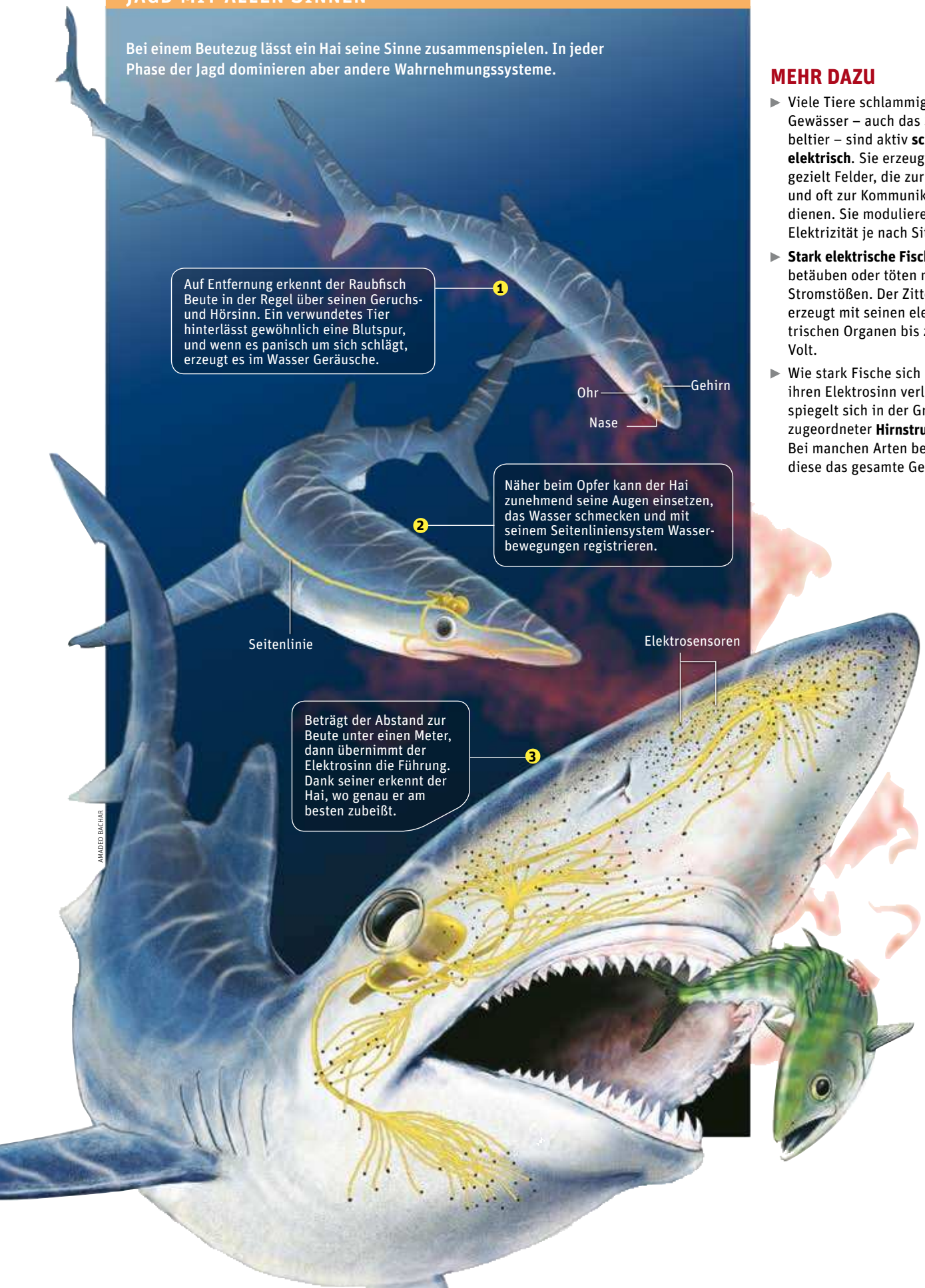
www.zeit-wissen.de

Erleben Sie ZEIT WISSEN, das intelligente Wissenschaftsmagazin! Lesen Sie Neues und Spannendes über Wissenschaft, Technik, Leben und Gesundheit: faszinierend, lebendig und lebensnah. Jetzt im Handel oder unter Tel. 0180/52 52 909 (14 Cent/Min. aus dem deutschen Festnetz, Mobilfunkpreise können abweichen).

ZEIT WISSEN
DAS WILL ICH WISSEN

Jagd mit allen Sinnen

Bei einem Beutezug lässt ein Hai seine Sinne zusammenspielen. In jeder Phase der Jagd dominieren aber andere Wahrnehmungssysteme.



MEHR DAZU

- Viele Tiere schlammiger Gewässer – auch das Schnabeltier – sind aktiv **schwach elektrisch**. Sie erzeugen gezielt Felder, die zur Ortung und oft zur Kommunikation dienen. Sie modulieren ihre Elektrizität je nach Situation.
- **Stark elektrische Fische** betäuben oder töten mit Stromstößen. Der Zitteraal erzeugt mit seinen elektrischen Organen bis zu 800 Volt.
- Wie stark Fische sich auf ihren Elektrosinn verlassen, spiegelt sich in der Größe zugeordneter **Hirnstrukturen**. Bei manchen Arten bedecken diese das gesamte Gehirn.

Schließlich wimmelt es im Ozean von elektrischen Störfeldern. Ob Wasserschichtungen unterschiedlichen Salzgehalts oder Säuregrads, Strömungen oder verschiedene Temperaturen – alles Mögliche ergibt Elektrosmog, der die schwachen Felder um Organismen vielleicht überdeckt. Schon ein einfacher Metalldraht bewirkt eine Spannung, die ein Hai ohne Weiteres aufspürt.

Kalmijn, der heute an der Scripps-Institution für Ozeanografie in San Diego (Kalifornien) arbeitet, und ich beschlossen, diese Meeresstudien zusammen durchzuführen. Mit dabei waren meine Frau Melanie und Kalmijns Mitarbeiterin Gail Heyer vom Ozeanografischen Institut in Woods Hole (Massachusetts). Um Haie direkt beim Jagen im Ozean zu testen, benötigten wir ein Boot ohne Metall. So kamen wir zu der sieben Meter langen »Boston Whaler«, die aus Glasfasermaterial konstruiert ist. Die viereckige Öffnung im Boden des Gefährts diente uns für die Experimente. Wir wollten herausfinden, ob die großen Haie der offenen See ihren Elektrosinn einsetzen, wenn sie einfach nur Beute machen. Zu dem Zweck konstruierten wir eine T-förmige Apparatur mit Elektroden an den Enden.

Wie sich Haie im letzten Moment täuschen lassen

Im Sommer 1981 war es so weit. Wir fuhren aufs Meer hinaus und senkten unser Gerät durch das Loch im Boot ins Wasser. Dann pumpten wir durch eine spezielle Öffnung zwischen den Elektroden zermahlenen rohen Fisch. Anschließend schaltete einer von uns nach einem Zufallsschema eine der Elektroden an. Dort entstand nun ein ganz schwaches elektrisches Feld ähnlich dem von Fischen. Jemand anders, der nicht wusste, welche Elektrode gerade eingeschaltet war, musste das Verhalten der Haie beobachten.

Schon die erste Nacht, in der wir vor dem Loch kauerten und gespannt ins dunkle Wasser hinunterblickten, war ein eindrucksvolles Erlebnis. Ein riesiger Blauhai kreiste unter uns. Dann nahm er die Blutspur auf und schwamm direkt auf die Öffnung in unserem Apparat zu, aus der Fischbrei tröpfelte. Doch im letzten Moment bog der Hai plötzlich scharf nach rechts ab – und biss in den rechten Arm der T-Konstruktion. Der Gigant erzitterte und zuckte wild. Dann ließ er die Elektrode abrupt wieder los.

Einen ähnlichen Ablauf beobachteten wir später noch oft. Die Haie orientierten sich offenbar fast bis zuletzt an der Blutspur. Doch zum Schluss attackierten sie die aktivierte Elektrode – und zwar nur diese. Offenbar war deren elektrisches Feld der entscheidende Reiz im Augenblick des Angriffs.

Demnach kann ein Reiz, den der Elektrosinn direkt vor dem Zubeißen erfasst, stärker sein als selbst ein starker Geruchs- oder Geschmacksreiz. Vielleicht erklärt das sogar manche Augenzeugenberichte über Angriffe auf Menschen. Es scheint nicht selten zu geschehen, dass ein Hai nur sein erstes Opfer immer wieder attackiert, aber eine weitere Person, die dem Verletzten zu Hilfe kommt und ihn abschleppt, völlig in Ruhe lässt. Man sollte meinen, dass das Raubtier sich in dem verwirbelten, blutgetrübten Wasser mit Nase und Augen nicht mehr so scharf orientieren kann, als dass es die beiden zappelnden Menschen auseinanderzuhalten vermag. Womöglich richtet sich der Hai aber jetzt nach dem starken elektrischen Feld, das direkt an der Wunde durch die Salze des ausströmenden Bluts entsteht.

Beim Jagen benutzen Haie sicherlich alle ihre Sinne (siehe Kasten links). Riechen und Hören sind besonders geeignet, um Beute aus größerer Entfernung zu orten. Näher bei dem Opfer dürften das Sehen, der Seitenliniensinn und letztlich auch der Geschmackssinn wichtiger werden. Der Elektrosinn tritt auf dem letzten Meter, direkt vor der Attacke, in Aktion: In der Endphase des Angriffs vermittelt er dem Räuber genauestens, wo sich die Beute befindet und wo seine Kiefer zuschnappen müssen. Mit diesen Erkenntnissen sollte es eines Tages möglich sein, Haie mit technischen Kniffs von Badestränden wegzulocken.

Meine Kollegen und ich haben den außerordentlich feinen Elektrosinn von Haien zuerst beim Fressen untersucht, weil sich solche Experimente noch vergleichsweise einfach durchführen lassen. Inzwischen glauben wir, dass diese Knorpelfische die Wahrnehmung elektrischer Felder auch für mehr Zwecke benutzen. Als Menschen brauchen wir sehr viel Fantasie, um uns vorzustellen, wie die Welt einem Tier mit sechs Sinnen vorkommt. ◁

R. Douglas Fields ist Neurobiologe an den Nationalen Gesundheitsinstituten der USA in Bethesda (Maryland).

Electroreception. Von T. H. Bullock et al. Springer 2005

Ampullary sense organs, peripheral, central and behavioral electroreception in shimaeras (*Hydrolagus*, Holocephali, Chondrichthyes). Von R. D. Fields et al. in: Brain, Behavior and Evolution, Bd. 41, S. 269, 1993

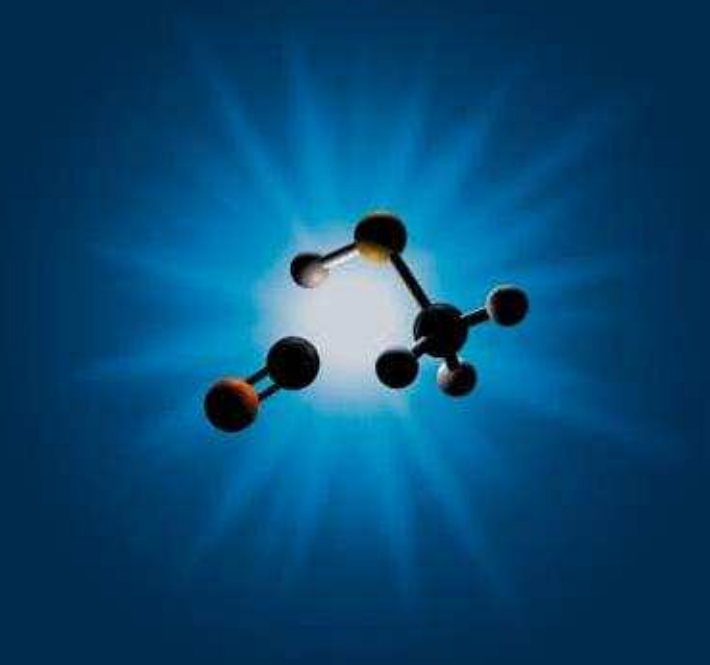
Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/905470.

Magnetfelder zum Schutz der Haie

ERIC STROUD UND MICHAEL HERMANN, SHARK DEFENSE

Nach Schätzungen des WWF ist jede fünfte Haiart bedroht. Jede Nacht fallen schätzungsweise 50 000 Haie der Langleinenfischerei zum Opfer, bei der lange Schnüre mit zahlreichen Angelhaken ausgebracht werden. Amerikanische Forscher möchten Vorrichtungen (Bild) entwickeln, um die Raubfische mit starken Magneten fernzuhalten, die ihre Elektrosensoren stören. Kommt der Hai in das Magnetfeld, soll ihn ein irritierender Strom durchziehen. Da die meisten Speisefische keinen Elektrosinn besitzen, würden sie trotzdem an den Haken gehen. Noch ist das Verfahren, dessen Entwicklung der WWF unterstützt, allerdings nicht erprobt, obwohl erste Versuche damit viel versprechend erscheinen. Ob sich eines Tages auch Sportler irgendwie mit Magneten schützen könnten, ist noch völlig offen.

EIN EINFACHER URSPRUNG DES LEBENS



KEN EWARD, BIOGRAFX

Das spontane Auftreten eines großen selbstreplizierenden Moleküls – bisher als Initialzündung des Lebens vermutet – ist extrem unwahrscheinlich. Miteinander gekoppelte Zyklen energiegetriebener Reaktionen zwischen kleinen Molekülen bieten eine plausiblere Alternative.

Von Robert Shapiro

Außergewöhnliche Entdeckungen verleiten zu kühnen Behauptungen. So berichtete James Watson, Francis Crick sei unmittelbar, nachdem die beiden die Struktur der DNA aufgeklärt hatten, »in das Eagle-Pub gestürmt, um jedem, der es hören wollte, zu erzählen, wir hätten das Geheimnis des Lebens enträtselt«. Die entdeckte Struktur – die elegante DNA-Doppelhelix – macht den Überschwang verständlich. Sie speichert die Erbinformation in einem Kode aus vier Molekülen, den so genannten Basen, welche die gleiche Rolle spielen wie die 26 Buchstaben des lateinischen Alphabets. Dabei steckt die Information in zwei langen Ketten, die sich wie Negativ und Positiv einer fotografischen Aufnahme zueinander verhalten.

Das legte einen einfachen Reproduktionsmechanismus nahe: Die beiden Stränge trennen sich und lagern jeweils frische DNA-Bausteine in der passenden Reihenfolge an, bis wieder eine Doppelhelix entstanden ist, die mit dem Original übereinstimmt. Anschließend liegt das Ausgangsmolekül in zweifacher Ausfertigung vor.

Die Watson-Crick-Struktur war Ausgangspunkt einer Fülle von Entdeckungen darüber, wie biologische Zellen heute funktionieren. Die neuen Erkenntnisse nährten auch Spekulationen über den Ursprung des Lebens. Medizin-Nobelpreisträger Hermann J. Muller sah im Erbmolekül »die heutige Entsprechung der ersten Organismen«. Auch der bekannte Exobiologe Carl Sagan stellte sich als Urformen des Lebens »primitive, frei lebende Gene in einer dünnen Lösung organischer Moleküle« vor. (Das Adjektiv »organisch« kennzeichnet dabei Substanzen, die Kohlenstoffatome enthalten, unabhängig davon, ob sie eine biologische Rolle spielen oder nicht.)

Solche Aussagen passen zu einigen der vielen Definitionen des Lebens, die bis heute vorgeschlagen wurden (siehe Spektrum der Wissenschaft Oktober 2007, S. 66). Die US-Raumfahrtbehörde Nasa zum Beispiel versteht unter einem Lebewesen ein sich selbst erhaltendes chemisches System, das zu einer darwinischen Evolution fähig ist.

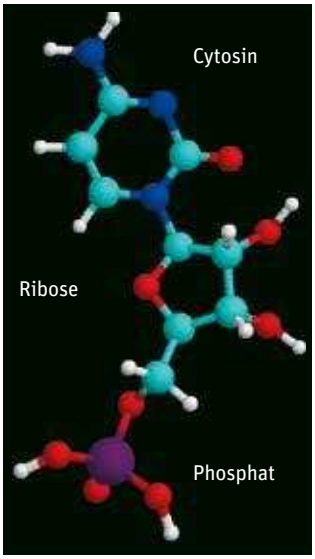
Richard Dawkins konkretisierte diese Vorstellungen von den ersten Organismen in seinem Buch »Das egoistische Gen«: »Irgendwann entstand zufällig ein ganz besonderes Molekül. Wir wollen es Replikator nennen. Es war vielleicht nicht das größte und komplexeste Molekül weit und breit, hatte aber die ungewöhnliche Fähigkeit, Kopien seiner selbst herzustellen.« Als Dawkins das vor dreißig Jahren schrieb, war die DNA der wahrscheinlichste Kandidat für einen solchen Replikator. Später übernahmen andere Moleküle diese Rolle. Ich selbst und etliche Kollegen sehen das Replikator-Modell der Entstehung des Lebens jedoch mit fundamentalen Mängeln behaftet. Uns scheint ein anderes Konzept wesentlich plausibler.

Ein typisches Henne-Ei-Problem

Die Schwächen der DNA-Theorie liegen auf der Hand. Die Doppelhelix braucht zu ihrer Verdopplung eine Reihe von Proteinen – Mitglieder einer Klasse großer Moleküle, die sich chemisch sehr stark von der DNA unterscheiden. Die einzige Gemeinsamkeit ist, dass beide aus kettenartig aneinandergereihten Untereinheiten bestehen. Während DNA jedoch mit einer langen Folge von vier Nukleotid-Bausteinen stets dieselbe helikale Struktur bildet und nur als Informationsspeicher dient, entsteht bei den Proteinen aus einem Sortiment von zwanzig Aminosäuren eine Vielfalt ganz verschieden geformter Moleküle für alle möglichen Aufgaben. Proteine sind gewissermaßen die Handwerker der Zellen. Ihre be-

In Kürze

- Grob gesagt gibt es **zwei Arten von Theorien** zum Ursprung des Lebens. Bei den einen soll zunächst per Zufall ein großes replikationsfähiges Molekül entstanden sein. Bei den anderen begann das Leben mit niedermolekularen Substanzen, die energiegetriebene Netzwerke chemischer Reaktionen schufen.
- Die zufällige Bildung eines replikationsfähigen Moleküls ist so **extrem unwahrscheinlich**, dass sie vermutlich höchstens ein einziges Mal im Universum stattfand.
- **Energiegetriebene Netzwerke** chemischer Reaktionen könnten sich, da sie von kleinen, natürlicherweise vorhandenen Molekülen ausgehen, dagegen sehr viel leichter etabliert haben. In diesem Fall wäre Leben wohl nicht auf die Erde beschränkt.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Gegen die Entstehung des Lebens aus RNA spricht, dass schon deren Bausteine – hier ein Cytidin-Nukleotid – komplizierte Moleküle sind, die sich praktisch nicht von selbst bilden können.

Die spontane Bildung von RNA ist, als würde ein Golfball einen 18-Loch-Kurs von allein absolvieren

kanntesten Vertreter, die Enzyme, beschleunigen zum Beispiel als Katalysatoren biochemische Prozesse, die sonst zu langsam ablaufen würden, um für die Zelle von Nutzen zu sein. Die Bauanleitung für die Proteine aber steht bei heutigen Organismen in der DNA.

Damit sind wir bei der alten Frage, was zuerst da war: das Huhn oder das Ei. Die DNA enthält die Bauanleitung für die Proteine; aber die sind ihrerseits erforderlich, um die Information abzulesen. Welche Makromoleküle waren also zuerst da – Proteine (Hühner) oder DNA (Eier)?

Als RNA die Welt beherrschte

Eine mögliche Lösung des Rätsels boten neue Erkenntnisse über einen dritten, zunächst wenig beachteten Mitspieler im Zellgeschehen: die RNA. Sie setzt sich wie DNA aus Nukleotiden zusammen, ist aber wesentlich vielseitiger. Einerseits werden RNA-Moleküle für Abschriften von Genen verwendet. Andererseits helfen sie als Hauptbestandteile der Ribosomen bei der Proteinsynthese. RNA kann sich wie DNA zu Doppelhelices zusammenlagern, aber wie Proteine auch komplizierte Strukturen aus verschlungenen Einzelsträngen bilden.

In den frühen 1980er Jahren wurden die Ribozyme entdeckt: enzymartige Moleküle, die aus RNA bestehen. Sie boten eine einfache Lösung für das Huhn/Ei-Problem. In einem wegweisenden Artikel in der Zeitschrift »Nature« schrieb der Nobelpreisträger Walter Gilbert 1986: »Man kann sich eine Lebenswelt vorstellen, in der es nur RNA-Moleküle gibt. Diese katalysieren die Synthese ihrer eigenen Kopien … Der erste Schritt in der Evolution wäre also die Entstehung von RNA-Molekülen mit der Fähigkeit, aus einer Nukleotid-Suppe Abbilder ihrer selbst zusammenzubauen.« Gemäß dieser Vorstellung erledigte anfangs selbstreplizierende RNA sämtliche grundlegenden Aufgaben, die heute auf RNA, DNA und Proteine verteilt sind.

Eine Reihe weiterer Erkenntnisse stützte diese Hypothese. So hängt an vielen kleinen Molekülen, die als so genannte Kofaktoren bei enzymatisch katalysierten Reaktionen mitwirken, ein RNA-Nukleotid ohne offensichtliche Funktion. Diese Strukturen gelten als molekulare Relikte aus der Zeit, als die RNA allein die Biochemie beherrschte.

Allerdings belegen solche und ähnliche Befunde nur, dass eine derartige Zeit existierte. Über die Entstehung des Lebens sagen sie nichts. Schließlich könnte es vor der RNA-Ära Stadien gegeben haben, in denen ganz andere Moleküle dominierten. Um Verwirrung zu vermeiden, benutze ich für die Hypothese, dass die RNA wirklich an der Entstehung des Lebens beteiligt war und nicht nur vor der DNA und den Proteinen auftrat, statt des gängigen, aber mehrdeutigen Begriffs »RNA-Welt« den Ausdruck »RNA zuerst«.

Auch diese Hypothese wirft freilich eine äußerst schwierige Frage auf: Wie entstand die erste selbstreplizierende RNA? Sie kann sich nämlich nicht so ohne Weiteres aus einer unbelebten Nukleotid-Suppe bilden, wie Gilbert das postuliert.

Schon die Bausteine der RNA, die Nukleotide, sind komplexe organische Moleküle (Bild links). Sie bestehen aus einem Zuckerrest, einer Phosphatgruppe und jeweils einer von vier verschiedenen stickstoffhaltigen Basen. Jedes RNA-Nukleotid enthält also neun oder zehn Kohlenstoff- sowie mehrere Stickstoff- und Sauerstoffatome, die zusammen mit der Phosphatgruppe zu einer bestimmten dreidimensionalen Struktur verbunden sind.

All diese Komponenten lassen sich zudem noch auf viele andere Arten zu einem Molekül zusammensetzen. Es sind also Tausende alternativer Nukleotidstrukturen denkbar, die jedoch in den uns bekannten RNAs nicht vorkommen. Daneben existieren Hunderttausende bis Millionen von stabilen organischen Molekülen ähnlicher Größe, die keine Nukleotide sind.

Die Vorstellung, dass sich vielleicht dennoch spontan die richtigen RNA-Bausteine bildeten, geht auf ein berühmtes Experiment zurück, das Stanley L. Miller 1953 durchführte. Der Biochemiker setzte eine Mischung einfacher Gase, die nach damaliger Ansicht der Atmosphäre in der erdgeschichtlichen Frühzeit entsprach, elektrischen Entladungen aus und erhielt einfache Aminosäuren. Solche Proteinbausteine fanden sich auch im Murchison-Meteoriten, der 1969 in Australien niederging.

Demnach stellte die Natur diese organischen Grundmaterialien offenbar einst in größerer Menge zur Verfügung. Durch Verallgemeinerung schlossen einige Forscher aus diesen Befunden, dass alle Grundbausteine des Lebens unter derart einfachen Bedingungen entstehen könnten und in Meteoriten vorkämen. Dies ist jedoch nicht der Fall.

Aminosäuren, wie Miller sie bei seinem Experiment erzeugte, sind viel einfacher aufgebaut als Nukleotide. Als charakteristisches Merkmal enthalten sie lediglich ein Kohlenstoffatom, an dem eine Amino- und eine Carboxylgruppe hängen: simple Gebilde aus einem Stickstoff- und zwei Wasserstoffatomen beziehungsweise einem Kohlenstoff-, einem Wasserstoff- und zwei Sauerstoffatomen. 17 der 20 in Proteinen vorkommenden Aminosäuren enthalten sechs oder weniger Kohlen-

stoffatome, die einfachste sogar nur zwei. Der Hauptteil der in Millers Experiment gebildeten organischen Moleküle – einschließlich der Aminosäuren – kam lediglich auf zwei oder drei Kohlenstoffatome.

Weder in den Produkten von Gasentladungsexperimenten noch in Meteoriten fanden sich jemals Nukleotide. Demnach bilden sich in der unbelebten Natur bevorzugt kleine Moleküle mit wenigen Kohlenstoffatomen. Eine Tendenz zur spontanen Entstehung von Nukleotiden, wie moderne Lebensformen sie benötigen, ist nicht erkennbar.

Um das »RNA zuerst«-Konzept zu retten, riefen seine Befürworter einen Forschungszweig namens präbiotische Synthese ins Leben. Sie versuchten im Labor zu zeigen, dass unter den Bedingungen auf der frühen Erde aus damals vorhandenen Substanzen in einer Abfolge sorgfältig kontrollierter Reaktionen RNA und ihre Bausteine entstehen können.

In einer erweiterten Online-Version dieses Artikels in englischer Sprache (www.spektrum.de/artikel/907547) habe ich die Unzulänglichkeiten der Ergebnisse dieses Forschungszweigs näher erläutert. Das zentrale Problem lässt sich anhand einer Analogie erläutern: Nachdem ein Golfer einen 18-Loch-Kurs erfolgreich absolviert hat, behauptet er, der Ball hätte das auch ohne ihn schaffen können – unter der Einwirkung natürlicher Kräfte wie Erdbeben, Stürmen, Regengüssen und so weiter –, wenn man ihm nur genügend Zeit gelassen hätte. Ähnlich wie in diesem Vergleich widerspräche die spontane Entstehung von RNA keinem Naturgesetz; nur wäre sie extrem unwahrscheinlich gewesen.

Einige Chemiker mutmaßen, vor der RNA sei ein anderes, einfacheres Replikatormolekül entstanden, das die präbiotische Chemie beherrschte. Es hätte über die gleichen katalytischen Fähigkeiten verfügen müssen. Da sich in heutigen Lebewesen bisher keine Spur eines solchen urtümlichen Replikators und Katalysators finden ließ, muss die RNA seine Funktion nach einiger Zeit vollständig übernommen haben.

Die Suppenschüssel war leer

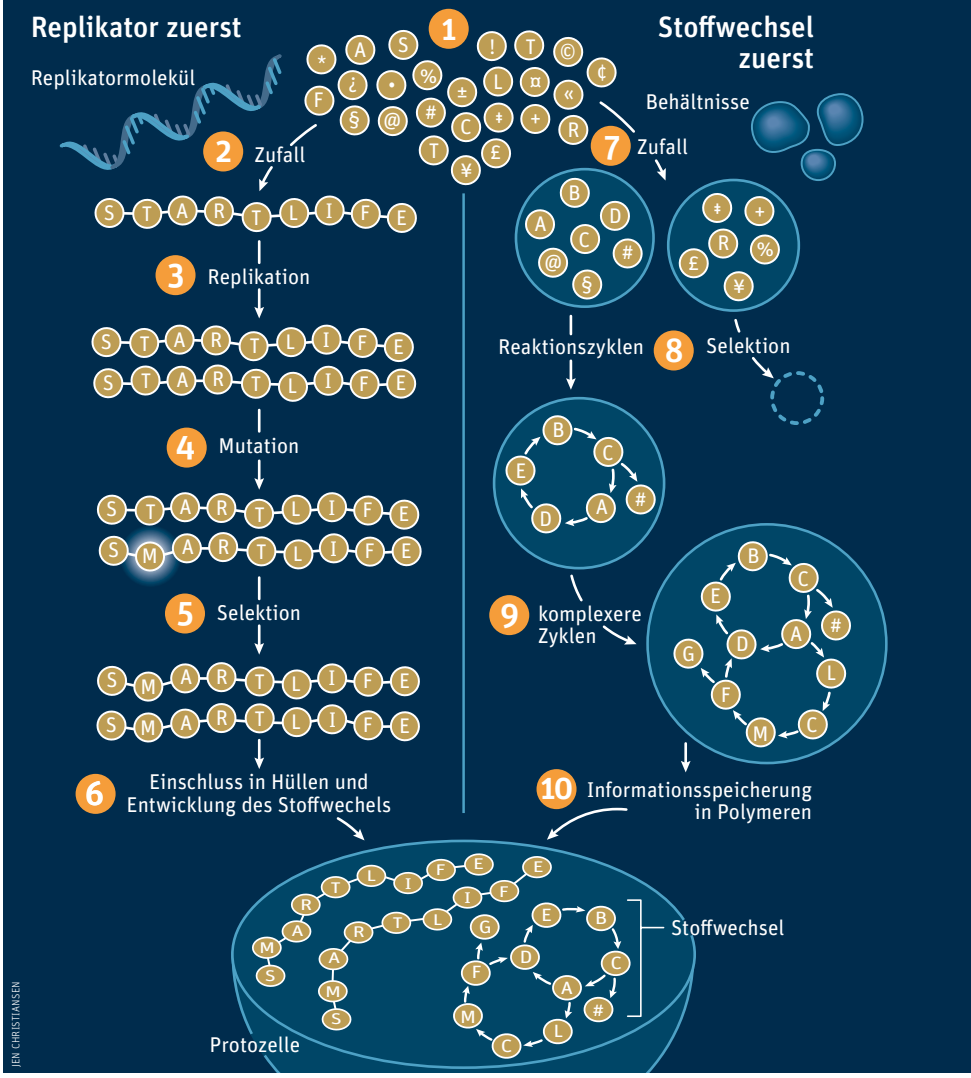
Aber selbst wenn die Natur tatsächlich eine Ursuppe aus Nukleotiden oder einfacheren analogen Bausteinen bereitgestellt hätte, wäre deren spontane Verknüpfung zu Replikatoren noch sehr viel unwahrscheinlicher gewesen als die Entstehung der Suppe selbst. Nehmen wir einmal an, eine solche Bouillon hätte existiert, noch dazu unter Bedingungen, welche die Bildung längerer Molekülketten begünstigen. Dann wären die wachsenden Polymere von Unmengen an ungeeigneten Bausteinen um-

Zuerst Vermehrung oder Stoffwechsel?

Die wissenschaftlichen Theorien zur Entstehung des Lebens zerfallen grob in zwei Gruppen, die sich mit den Schlagworten »Replikator zuerst« und »Stoffwechsel zuerst« charakterisieren lassen. Am Anfang standen jeweils Moleküle, die sich durch nichtbiologische chemische Prozesse gebildet hatten und hier als beschriftete Kugeln dargestellt sind (1).

Nach dem »Replikator zuerst«-Modell verbanden sich einige davon zu Ketten, wobei irgendwann zufällig ein replikationsfähiges Makromolekül herauskam – möglicherweise eine Art RNA (2). Dieses Molekül erzeugte Kopien von sich selbst (3). Durch Fehler entstanden dabei auch leicht abgewandelte Versionen (4). Diese Mutanten waren teils nicht mehr replikationsfähig. Einige aber funktionierten unter den herrschenden Bedingungen besser und verdrängten die Vorläufer (5). Im Lauf dieser Evolution müssen sich die Replikatoren schließlich mit Membranhüllen umgeben haben. In deren Innerem entwickelten sich dann Stoffwechselzyklen, bei denen kleinere Moleküle eine externe Energiequelle für nützliche Reaktionen anzapften (6).

Das »Stoffwechsel zuerst«-Modell geht von natürlich vorhandenen umgrenzten Raumbereichen aus (7), die hier als flüssigkeitsgefüllte Membranen dargestellt sind. Einige enthielten Gemische von Materialien, die mit Hilfe einer externen Energiequelle Reaktionszyklen durchlaufen konnten (8). Diese Zyklen wurden mit der Zeit immer komplexer (9). Erst danach ging das System schließlich dazu über, Information in Polymeren zu speichern (10).



Die unbelebte Natur liefert eine Fülle von Mischungen kleiner Moleküle als mögliche Brutstätten für Leben

geben gewesen, nach deren Einbau die entstehende Kette die Fähigkeit zur Replikation verlor. Der einfachste Fall eines fehlerhaften Bausteins wäre einer, der nur einen »Arm« besitzt statt der zwei, die zur Verkettung mit anderen Bausteinen nötig sind.

In ihrer Indifferenz hätte die Natur die Bausteine in zufälliger Weise kombiniert und so eine unübersehbare Vielfalt kurzer, frühzeitig abgebrochener Ketten erzeugt. Die Wahrscheinlichkeit, dass stattdessen ein viel längeres Polymer mit gleichförmigem molekularem Rückgrat entstand, das sich als Replikator und Katalysator zugleich eignete, war dagegen verschwindend gering. Schon ein einziges solches Ereignis zu irgendeiner Zeit irgendwo im gesamten sichtbaren Universum müsste als riesiger Glücksfall gelten.

Der Medizin-Nobelpreisträger Christian de Duve forderte daher, »Hypothesen abzulehnen, die Ereignisse voraussetzen, welche so extrem unwahrscheinlich sind, dass sie als Wunder bezeichnet werden müssen und daher nicht Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchung sein können«. DNA, RNA, Proteine und andere große, komplexe Makromoleküle scheiden damit als Mitspieler beim Ursprung des Lebens aus. Die unbelebte Natur verfügt jedoch über eine Vielzahl kleinerer Moleküle, die als Bestandteile organisierter Reaktionssysteme sehr wohl in Betracht kommen.

Tatsächlich existiert schon seit Jahrzehnten eine Reihe alternativer Hypothesen, die auf solchen einfacheren Ausgangssubstanzen beruhen. Ihnen liegt keine genetische, sondern eine thermodynamische Definition des Lebens zu Grunde, wie sie Sagan in der Enzyklopædia Britannica formuliert hat. Als lebendig gilt danach jede begrenzte Raumregion, in der die Ordnung durch energiegetriebene Reaktionszyklen zunimmt (die Entropie also abnimmt). Dieser Ansatz, der von kleinen Molekülen ausgeht, beruht auf Ideen des russischen Biologen Alexander Oparin. Daraus abgeleitete Hypothesen zur Entstehung des Lebens unterschieden sich zwar in gewissen Details, haben jedoch fünf Grundvoraussetzungen gemeinsam, die ich im Folgenden – zusammen mit eigenen Vorstellungen – erläutern möchte.

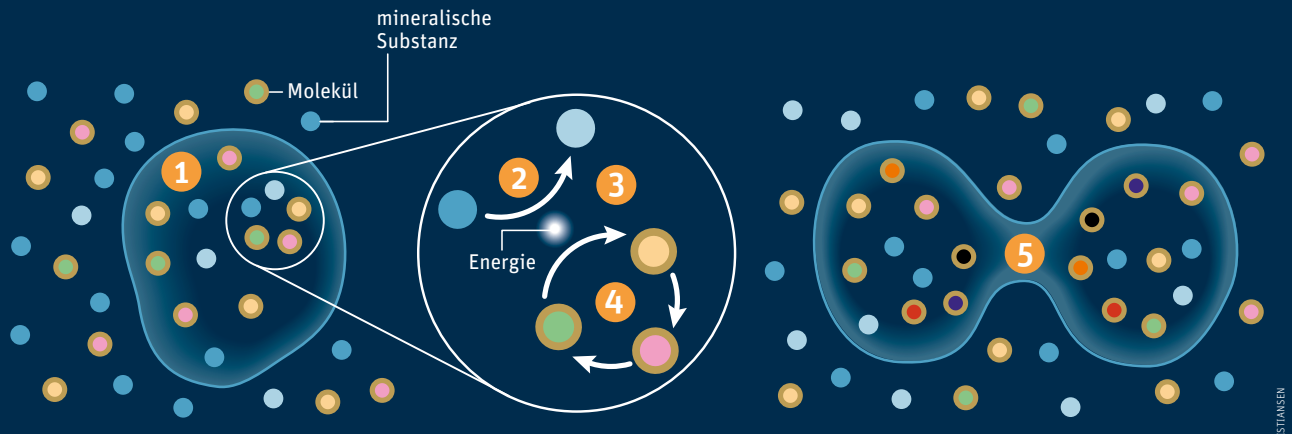
1. Belebter und unbelebter Raum müssen durch eine Grenzschicht getrennt sein

Leben ist durch einen hohen Organisationsgrad gekennzeichnet. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt zwar, dass die En-

Voraussetzungen des Stoffwechsel-zuerst-Szenarios

Mindestens fünf Bedingungen müssen erfüllt sein, damit niedermolekulare Substanzen Vorformen des Lebens hervorbringen können, in denen energiegetriebene Zyklen chemischer Reaktionen lokal einen Zustand höherer Ordnung schaffen.

1. Eine Membranhülle oder andere Grenzschicht schafft ein Behältnis, das die »lebende« Region von der Umwelt trennt.
2. Es gibt eine Energiequelle – hier dargestellt durch eine mineralische Substanz (blau), in der eine Wärme erzeugende Reaktion abläuft.
3. Die freigesetzte Energie treibt eine weitere chemische Umwandlung an.
4. Ein Netzwerk von Folgereaktionen mit zunehmender Komplexität ermöglicht Anpassung und Evolution.
5. Das Reaktionsnetzwerk verleibt sich mehr Material ein, als es verliert, und die wachsenden Membranbläschen vermehren sich durch Teilung. Ein informationsspeicherndes Molekül wie RNA oder DNA ist dabei zunächst nicht erforderlich, da die Erbinformation in der Identität und Konzentration der Substanzen des Netzwerks selbst enthalten ist.



JEN CHRISTIANSEN

tropie – sprich: Unordnung – des Universums stetig zunimmt. Eine örtlich begrenzte Abnahme ist aber möglich, falls sie durch eine stärkere Zunahme in der Umgebung wettgemacht wird. Wenn lebende Zellen wachsen und sich vermehren, wandeln sie chemische Energie in Wärme um, die sie nach außen abgeben. Die resultierende Entropiezunahme in der Umwelt gleicht die Abnahme im Zellinnern aus. Die Grenzschicht gewährleistet die Trennung von belebten Systemen und ihrer Umgebung.

In heutigen Organismen dienen dazu komplexe doppellagige Lipidmembranen. Als das Leben entstand, muss eine bereits existierende Struktur diese Funktion übernommen haben. David W. Deamer von der Universität von Kalifornien in Santa Cruz hat beispielsweise membranartige Gebilde in Meteoriten entdeckt. Andere Forscher vermuten eine Abgrenzung durch Strukturen, die heutige Organismen nicht mehr nutzen – etwa Eisensulfidmembranen, mineralische Oberflächen (auf denen elektrostatische Wechselwirkungen die belebten Moleküle von ihrer Umgebung separieren), kleine Tümpel oder Aerosole.

2. Eine externe Energiequelle muss den Organisationsprozess in Gang halten

Wir Menschen konsumieren zur Selbsterhaltung Kohlenhydrate und Fette, die wir mit Hilfe des eingeatmeten Sauerstoffs verbrennen. Mikroorganismen sind vielseitiger; manche können sich sogar von Mineralen ernähren. In beiden Fällen laufen so genannte Redoxreaktionen ab. Dabei wandern Elektronen von einer elektronenreichen (reduzierten) zu einer elektronenarmen (oxidierten) Substanz. Pflanzen können Sonnenenergie direkt einfangen und für ihre Lebensfunktionen nutzbar machen. Unter besonderen Umständen greifen Zellen auch auf andere Energiequellen zurück, etwa Unterschiede im Säuregrad diesseits und jenseits einer Membran. Extraterrestrische Lebensformen nutzen zum gleichen Zweck möglicherweise Radioaktivität oder Temperatursprünge.

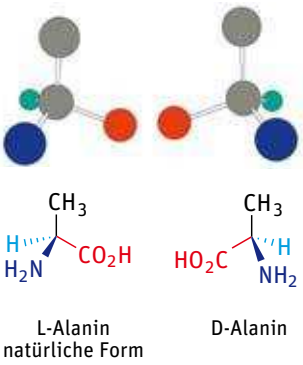
3. Die Energiegewinnung muss mit dem Organisationsprozess, der ein lebendes System hervorbringt und erhält, gekoppelt sein.

Das Freisetzen von Energie bringt nicht zwangsläufig einen Nutzen. Beim Verbrennen von Benzin im Motor eines Autos wird chemische Energie frei. Aber nur wenn sie dazu dient, die Räder anzutreiben, fährt das Auto auch. Dazu ist eine mechanische Verbindung, die Kupplung, erforderlich. Jeder von uns baut in seinen Zellen jeden Tag mehrere Pfund eines Nukleotids namens ATP ab. Die dabei freigesetzte Energie treibt lebenswich-

URSPRUNG DER HÄNDIGKEIT

Wie erklärt die Stoffwechsel-zuerst-Hypothese, dass alle biologischen Makromoleküle eine bestimmte Händigkeit aufweisen?

Wenn das Mineral, das mit seiner Transformation den Reaktionszyklus antreibt, selektiv nur eine von zwei spiegelbildlichen Formen des Moleküls A zur Umsetzung bringt, bilden sich das Produkt B und nachfolgende Moleküle des Zyklus vielleicht ebenfalls nur in einer der beiden Formen. Die explizite Kontrolle der Händigkeit oder Chiralität wird erst nötig, sobald sich kleine chirale Substanzen zu größeren Molekülen verbinden.



OLIVER REISER, UNIVERSITÄT REGENSBURG

L-Alanin
natürliche Form

D-Alanin

Von Alanin und anderen Aminosäuren gibt es zwei spiegelbildliche Formen, von denen nur eine natürlich vorkommt.

Springer

NEU

Kosmische Doppelgänger

Wie es zum Urknall kam und wie unzählige Universen entstehen

A. Vilenkin

Alex Vilenkin, einer der kreativsten Kosmologen unserer Zeit, zeichnet leicht verständlich das faszinierende Weltbild der modernen Kosmologie. Er schildert die Urknall-Theorie und ihre Erweiterung durch das Szenario der Kosmischen Inflation. Und warum ständig neue Universen entstehen. Eine der erstaunlichsten Aussagen: Dass es Regionen im Kosmos geben muss, unendlich viele sogar, die mit unserer identisch sind. Es gibt Welten mit exakten Doppelgängern von uns! Die Folge: Der Abschied von unserer Einzigartigkeit!
Dieses reich illustrierte Buch gibt viele verblüffende Antworten.

2008. 278 S. 50 Abb. Geb.
ISBN 978-3-540-73917-3
► **€ (D) 19,95 | € (A) 20,50 | *sFr 32,50**

springer.de

Bei Fragen oder Bestellung wenden Sie sich bitte an ► Springer Distribution Center GmbH, Haberstr. 7, 69126 Heidelberg ► **Telefon:** +49 (0) 6221-345-4301 ► **Fax:** +49 (0) 6221-345-4229 ► **Email:** SDC-bookorder@springer.com ► € (D) sind gebundene Ladenpreise in Deutschland und enthalten 7% MwSt; € (A) sind gebundene Ladenpreise in Österreich und enthalten 10% MwSt. Die mit * gekennzeichneten Preise für Bücher sind unverbindliche Preisempfehlungen und enthalten die landesübliche MwSt. ► Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten. ► Springer-Verlag GmbH, Handelsregistersitz: Berlin Charlottenburg, HR B 91022. Geschäftsführer: Haank, Mos, Hendriks

013315x

Antwort eines Verfechters der RNA-zuerst-Theorie

Steven A. Benner vom Westheimer Institute for Science and Technology in Gainsville (Florida) erklärt, warum er die Entstehung von Leben aus selbstreplizierenden Molekülen weiterhin für plausibler hält.

Auch wenn die spontane Entstehung von RNA als sehr unwahrscheinlich erscheint, sprechen doch alle Forschungsergebnisse bisher für das RNA-zuerst-Modell vom Ursprung des Lebens. Zwar bilden die meisten organischen Moleküle, wenn man ihnen Energie in Form von Blitzen oder von Hitze vulkanischen Ursprungs zuführt, eine teerartige Masse, die kaum als Zündfunke für das Leben taugt. Die **Stoffwechsel-zuerst-Modelle**, soweit sie durch Experimente mit realen Chemikalien gestützt werden, leiden jedoch unter demselben Problem: Moleküle, die reaktiv genug sind, um an Stoffwechselreaktionen teilzunehmen, sind auch reaktiv genug, sich zu zersetzen.

Die Ribose, für die das »R« in RNA steht, bietet ein Lehrstück darüber, wie ein für »unlösbar« erklärtes Problem sich in Wahrheit eben doch nur als »noch nicht gelöst« erweisen kann. Dieser Zucker schien lange Zeit mittels präbiotischer Synthesen – also Reaktionen zwischen Molekülen, die auf der frühen Erde existiert haben könnten – unmöglich herstellbar zu sein. Als Grund dafür galt, dass er eine Carbonylgruppe enthält, in der ein Sauerstoff- mit einem Kohlenstoffatom über eine Doppelbindung verknüpft ist. Diese Gruppe vermittelt sowohl eine erwünschte Reaktivität (die Fähigkeit zur Teilnahme am Stoffwechsel) wie eine unerwünschte (die Fähigkeit zur Teerbildung). Noch vor einem Jahrzehnt kam Stanley L. Miller zu dem Schluss, dass die Instabilität der Ribose auf Grund ihrer Carbonylgruppe »die Verwendung dieses und anderer Zuckermoleküle als präbiotische Reagenzien unmöglich macht … Ribose und andere Zucker waren folglich **keine Bestandteile der ersten Erbsubstanz**«.

Doch Ursuppen brauchen Schüsseln aus geeignetem Material und keine sterilen Glaskolben zum Köcheln. Eine angemessene Schüssel findet sich heute etwa im Tal des Todes in Kalifornien. Das Gegenstück auf der frühen Erde wäre abwechselnd feucht und trocken, reich an organischem Material und vor allem voller borhaltiger Minerale gewesen. Was das Bor soll? Nun, es stabilisiert Kohlenhydrate wie Ribose. Mehr noch: Wenn man Salze der Borsäure mit organischen Substanzen mischt, die reichlich in Meteoriten vorkommen, und diese Mixtur künstlichen Blitzen aussetzt, entstehen aus Formaldehyd beachtliche Mengen an Ribose, die sich keineswegs sofort zersetzt.

Das beweist zwar noch nicht, dass die ersten Lebensformen wirklich schon Genetik mit RNA betrieben. Wenn ein »unlösbares« Problem am Ende eine so einfache Lösung findet, sollte uns das aber warnen, ganze Forschungsrichtungen nur deshalb zu verwerfen, weil einige **heikle Punkte noch ungeklärt sind**.

tige biochemische Prozesse an, die sonst zu langsam oder gar nicht ablaufen würden. Der ATP-Abbau ist über eine gemeinsame Zwischenstufe mit diesen Vorgängen verknüpft, die zudem durch Enzyme beschleunigt werden. Die Entstehung von Leben aus kleinen Molekülen war nur möglich, wenn auf der frühen Erde gekoppelte Reaktionen und primitive Katalysatoren existiert haben.

4. Chemische Netzwerke müssen sich ausbilden, um Anpassung und Evolution zu ermöglichen.

Hier kommen wir zum Kernpunkt. Nehmen wir an, in einem abgetrennten Raum treibe die energetisch begünstigte Redoxreaktion eines Minerals die Umwandlung einer organischen Substanz A in das Produkt B an. Damit fungiert sie quasi als Motor des Organisationsprozesses. Würde sich B nun einfach in A zurückverwandeln oder aus dem Behältnis entweichen, entstünde kein höherer Organisationsgrad. Anders, wenn B in einem mehrstufigen Prozess – sagen wir über die Zwischenprodukte C und D – wieder zu A wird. Dann liegt ein Kreisprozess vor, der ein höher organisiertes System verkörpert. Der anhaltende Fluss nutzbarer Energie aus der anorganischen Reaktion würde diesen Zyklus in Gang halten (siehe Kasten rechts).

Auch Seitenzweige können vorkommen – zum Beispiel, indem sich eine weitere Substanz, die nicht Bestandteil des Reaktionszyklus ist, in D verwandelt. Sie führt dem Zyklus neues Material zu und beschleunigt dadurch die Energiefreisetzung durch die Antriebsreaktion, da sie dafür sorgt, dass im Endeffekt mehr A entsteht.

Ein solcher Reaktionskreislauf kann sich auch an variable Umweltbedingungen anpassen. Als Kind war ich fasziniert davon, wie sich das Wasser aus einem undichten Hydranten seinen Weg zum nächstgelegenen Gully suchte. Wo Blätter oder Abfälle diesen Weg versperrten, staute sich das Rinnsal, bis es eine Umgehung des Hindernisses gefunden hatte.

Gleiches gilt, wenn eine Veränderung des Säuregrads oder ein anderer Umweltfaktor einen Schritt in der Reaktionskette von B zurück zu A blockiert. Dann häuft sich das betreffende Zwischenprodukt an, bis sich ein alternativer Reaktionspfad eröffnet.

Weitere analoge Modifikationen könnten den ursprünglichen Zyklus zu einem Netzwerk ausweiten. Eine derartige zufallsgesteuerte Erkundung der chemischen »Landschaft« führt schließlich vielleicht zur Synthese von Substanzen, die Schlüsselreaktionen des Zyklus beschleunigen und so für eine effizientere Nutzung der Energie sorgen.

5. Das Netzwerk muss wachsen und sich reproduzieren.
Um zu überleben und zu wachsen, muss sich das Netzwerk mehr Material einverleiben, als es verliert. Entropieeffekte begünstigen die Diffusion von Substanzen durch die Grenzschicht in die Umwelt. Gewisse Materialverluste sind also unvermeidlich. Manche Nebenreaktionen produzieren vielleicht flüchtige Gase oder teerartige Substanzen, die entweichen beziehungsweise aus der Lösung ausfallen. Übersteigen diese Verluste die Zugewinne, kommt der Zyklus irgendwann zum Erliegen. Das Gleiche passiert, wenn der Nachschub an Treibstoff von außen stockt. Wahrscheinlich bildeten sich auf der frühen Erde viele derartige Reaktionsnetzwerke, die unterschiedliche Antriebsreaktionen und Energiequellen nutzten. Letztlich überlebte aber nur eine besonders robuste Variante.

Dazu brauchte sie auch einen Reproduktionsmechanismus. Falls die Lösung, in der die vernetzten Reaktionszyklen ablaufen, von einer Lipidmembran umschlossen ist, kann sich dieses Säckchen durch Einwirkung mechanischer Kräfte in zwei kleinere aufspalten, sobald es eine bestimmte Größe überschritten hat. Freeman Dyson vom Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey) sprach deshalb einmal von einer »Müllsackwelt« im Unterschied zur »sauberen, ordentlichen« RNA-Welt. Analog kann ein System in einem mineralischen Hohlraum in benachbarte Poren überlaufen.

Sobald sich separate, unabhängige Einheiten gebildet haben, würden diese sich in unterschiedlicher Weise fortentwickeln und um Ausgangsstoffe konkurrieren. Damit haben wir den Übergang von Lebensformen, die aus unbelebter Materie durch Nutzung einer zufällig vorhandenen Energiequelle entstehen, zu solchen, die sich in einer darwinischen Evolution ihrer Umgebung anpassen.

Zuerst kam der Stoffwechsel

Szenarien dieses Typs laufen üblicherweise unter dem Begriff »Stoffwechsel zuerst«. Er bringt zum Ausdruck, dass die frühesten Lebensformen in diesem Fall noch nicht über einen Mechanismus der Vererbung im herkömmlichen Sinn verfügten: Ihnen fehlten Moleküle oder Strukturen, welche die im System vorhandene Information speichern und nach Vervielfältigung an die Nachkommen weitergeben konnten.

Allerdings enthält ein Sortiment von Gegenständen selbst bereits die Information, die in einer Liste davon steckt. So kann ich aus den Lebensmitteln, die ich vom Supermarkt mitbringe, ohne Weiteres ableiten, was auf dem Einkaufszettel stand, den mir meine Frau mitgegeben hat. Entsprechend bezeichnete Doron Lancet vom Weizman-Institut in Rehovot (Israel) die Speicherung von Erbinformationen in Form kleiner Moleküle als »Kompositgenom« im Unterschied zu einer beschreibenden Liste in Form von DNA oder RNA.

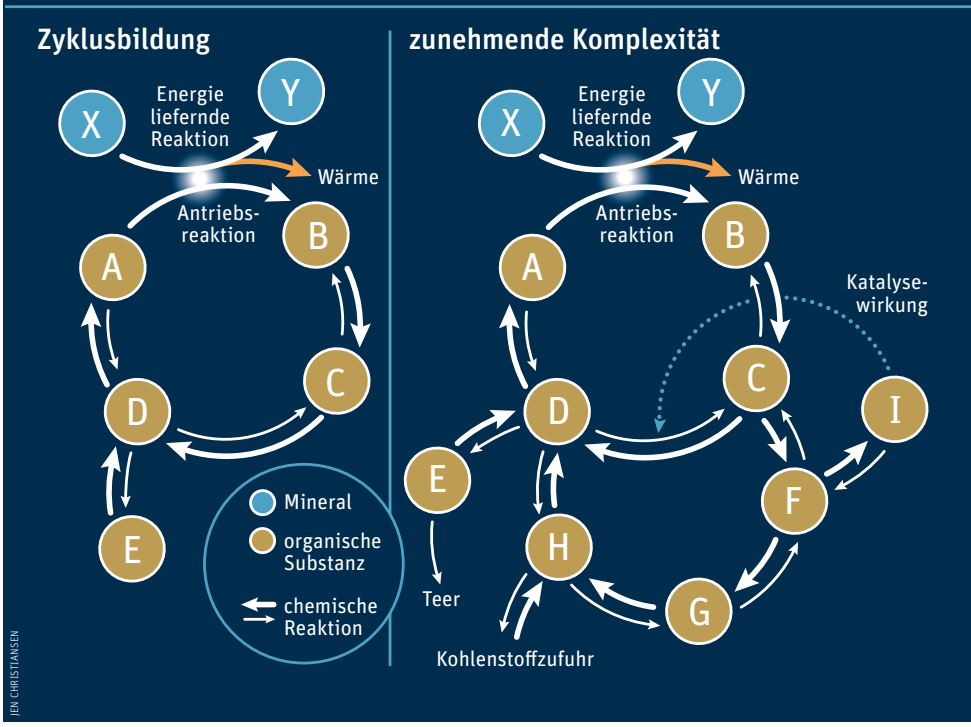
Die geschilderten Voraussetzungen für den niedermolekularen Ursprung des Lebens mögen manchem anspruchsvoll erscheinen. Sie sind jedoch allgemeiner Natur. Dass sie erfüllt waren, ist deshalb wesentlich wahrscheinlicher

Die Evolution chemischer Netzwerke

Die Stoffwechsel-zuerst-Hypothese setzt voraus, dass sich ein Netzwerk chemischer Reaktionen bildet, das an Komplexität zunimmt und sich Veränderungen der Umwelt anpasst.

Zyklusbildung: Eine Energiequelle – hier die Umwandlung von Mineral X in Y – ist mit einer Reaktion gekoppelt, die das organische Molekül A in B umsetzt. Weitere Reaktionen (B zu C, C zu D, ...) bilden einen Zyklus, der zu A zurückführt. Über Reaktionen, an denen Substanzen außerhalb des Zyklus beteiligt sind (E), nimmt das System weiteres Material auf.

Zunehmende Komplexität: Sobald eine Veränderung der Umweltbedingungen eine Reaktion des Zyklus hemmt (etwa von C zu D), kommt es zu Umleitungen – in diesem Beispiel über die Zwischenprodukte F, G und H. Dabei könnte zufällig ein Katalysator (I) entstehen, der auf die Umsetzung von C zu D zurückwirkt (gepunktete Linie) und sie erleichtert. Um zu überleben und zu wachsen, muss das sich fortentwickelnde Reaktionsnetzwerk mehr kohlenstoffhaltige Substanzen aus der Umwelt einbeziehen, als es an sie verliert – etwa durch Diffusion oder Nebenreaktionen, bei denen sich teerartige Niederschläge bilden.



als das spontane Auftreten von hochkomplexen vielstufigen Reaktionsketten, die zur Bildung eines Replikators führen.

Im Lauf der Jahre sind viele theoretische Untersuchungen zu verschiedenen »Stoffwechsel zuerst«-Systemen erschienen. Allerdings wurden kaum experimentelle Ergebnisse zu ihrer Untermauerung publiziert. Die wenigen entsprechenden Veröffentlichungen demonstrieren nur die Möglichkeit einzelner Reaktionsschritte in einem vorgeschlagenen Zyklus.

Den größten Beitrag leistete wohl die Gruppe von Günter Wächtershäuser an der Technischen Universität München. Sie konnte Teile eines Reaktionszyklus realisieren, der die Verknüpfung und Trennung von Aminosäuren in Gegenwart von Metallsulfid-Katalysatoren beinhaltet. Als Energiequelle diente die Oxidation von Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid. Bisher gelang es den Forschern aber weder, einen kompletten solchen Zyklus in Gang zu bringen, noch zu zeigen, dass er sich selbst aufrechterhalten und in einem Evolutionsprozess weiterentwickeln kann. Bis zu einem erfolgreichen derartigen Versuch bleiben alle Szenarien zum niedermolekularen Ursprung des Lebens also zugegebenermaßen hypothetisch.

Der erste wichtige Schritt auf dem Weg zu einem *experimentum crucis* wäre die Definition möglicher Antriebsreaktionen – Umwandlungen niedermolekularer Substanzen (A in B im obigen Beispiel), die mit einer reichlich vorhandenen externen Energiequelle gekoppelt sind (zum Beispiel mit Kohlenmonoxid oder einer oxidierbaren mineralischen Substanz). Das übrige System muss wohl nicht vorab in allen Einzelheiten spezifiziert werden. Man mischt einfach in einem geeigneten Reaktionsgefäß die ausgewählten Komponenten (einschließlich einer Energiequelle) mit anderen niedermolekularen Substanzen, die bei natürlichen Prozessen entstehen und vermutlich auf der frühen Erde in größeren Mengen vorkamen.

Falls sich ein chemisches Netzwerk ausbildet, das sich weiterentwickelt, wäre zu erwarten, dass die Konzentration der Reaktionsteilnehmer im Netzwerk mit der Zeit ansteigt beziehungsweise fluktuiert. Neue Katalysatoren, die einzelne Schlüsselreaktionen beschleunigen, könnten auftreten, während die Konzentration irrelevanter Substanzen vermutlich abnähme. Das Reaktionsgefäß müsste mit einem Zufluss für den Nachschub an Treibstoff und Ausgangssubstanzen sowie mit einem Abfluss zum Entfernen von Endprodukten und unbeteiligten Stoffen versehen sein.

Fehlschläge wären leicht erkennbar. Vielleicht würde die Energie verbraucht, ohne wesentliche Änderungen in der Konzentration der anderen Substanzen hervorzurufen, oder ein unlöslicher, teerartiger Niederschlag entstünde, der die Apparatur verstopft.

Ein erfolgreiches Experiment böte dagegen ein Beispiel für die ersten Schritte auf dem Weg zu lebenden Systemen. Diese müssten nicht dieselben sein, die einst tatsächlich stattfanden. Wichtiger ist es zu zeigen, dass das Grundprinzip funktioniert, und es für weitere Untersuchungen nutzbar zu machen. Möglich wäre ja, dass einst an verschiedenen Stellen der Erde abhängig von den lokalen Umweltbedingungen jeweils andere Routen zum Leben beschritten wurden.

Wir sind nicht allein

Ein gelungenes solches Experiment würde zwar nicht aufzeigen, wie sich die uns heute vertrauten Organismen auf der Basis von DNA, RNA und Proteinen entwickelt haben. Man könnte es sich jedoch leicht ausmalen. Nukleotide müssen, da die Evolution nicht zielgerichtet verläuft, zunächst andere Aufgaben wahrgenommen haben, zum Beispiel als Katalysatoren oder als Speicher für chemische Energie (das phosphorylierte Nukleotid ATP erfüllt diese Funktion noch heute). Ein zufälliges Ereignis oder spezielle Umstände haben dann wahrscheinlich zur Bildung von Ketten aus RNA-Nukleotiden geführt.

Heute stellen RNA-Moleküle, die aus derartigen Ketten bestehen, den Hauptteil einer Struktur, welche die Aminosäuren bei der Proteinsynthese verknüpft. Die erste RNA diente vielleicht dem gleichen Zweck, nur ohne Präferenz für bestimmte Aminosäuren. Die »Erfindung« der heutigen hochkomplexen Mechanismen der Replikation und der Synthese von Proteinen mit vorab festgelegter Zusammensetzung erforderte unzählige weitere evolutionäre Schritte.

Die Art der Lebensentstehung hat auch entscheidende Bedeutung für unsere Stellung im Universum. Ein extrem unwahrscheinliches Szenario wie bei der »RNA zuerst«-Hypothese bedeutet wohl, dass wir allein in den Weiten des Weltalls sind. Der Biochemiker Jaques Monod drückte es einmal so aus: »Das Universum ging nicht mit dem Leben und die Biosphäre nicht mit dem Menschen schwanger. Wir sind der Zufallstreffer in einer großen Lotterie.«

Falls das Leben aber wirklich aus kleinen Molekülen entstanden ist, wäre es, wie der Biologe Stuart Kauffman schreibt, »weitaus verbreiteter als bisher gedacht. Wir sind dann nicht nur im Universum zu Hause, sondern teilen es auch mit bisher unbekannten Gefährten«. ◁

Robert Shapiro ist emeritierter Professor für Chemie und Senior Research Scientist an der Universität New York. Von ihm stammen mehr als 125 Publikationen, vor allem auf dem Gebiet der DNA-Chemie. Sein Hauptinteresse galt der Frage, wie Umweltchemikalien unser Erbgut schädigen und Krebs verursachen können.

Small molecule interactions were central to the origin of life. Von Robert Shapiro in: Quarterly Review of Biology, Bd. 81, S. 105, 2006

Early systems biology and prebiotic networks. Von Barak Shenhav et al. in: Transactions on Computational Systems Biology, Bd. 1, S. 14, 2005

A primordial possible peptide cycle. Von Claudia Huber et al. in: Science, Bd. 301, S. 938, 15.8.2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/905467.

ERDE OHNE MENSCHEN

Um die Auswirkungen der Menschheit auf die Umwelt abzuschätzen, kann man auch überlegen, wie es der Welt erginge, wenn alle Menschen verschwunden wären.

Ein Gespräch mit Alan Weisman

FOTOILLUSTRATION: KENN BROWN; FOTOS: EMILY HARRISON

Ein verbreiteter Albtraum ist die Vorstellung, man wäre der letzte lebende Mensch auf der Erde. Doch was würde geschehen, wenn plötzlich alle Menschen von unserem Planeten verschwänden? Auf dieser Idee basiert »The World without Us«, das neue Buch des Sciencefiction-Autors Alan Weisman (»Die Welt ohne uns – Reise über eine unbevölkerte Erde«, Piper), der hauptberuflich als Journalistik-Professor an der Universität von Arizona tätig ist. In diesem breit angelegten Gedankenexperiment nennt Weisman keine genauen Gründe, die zur Auslöschung des Homo sapiens geführt haben könnten. Er geht stattdessen einfach nur vom abrupten Verschwinden unserer Spezies aus – und stellt sich die Folgewirkungen vor, die in den Jahren, Jahrzehnten und Jahrhunderten danach voraussichtlich eintreten.

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

Weisman zufolge würde bei einem großen Teil unserer Infrastruktur fast sofort der Zerfall einsetzen. Ohne Straßenreinigung und Ausbesserungsarbeiten bekommen unsere Straßen und Autobahnen bereits innerhalb weniger Monate Risse und Buckel. In den folgenden Jahrzehnten stürzen Häuser und Bürogebäude ein. Andere von Menschenhand gefertigte Objekte widerstehen dem Verfall dagegen extrem lange. Edelstahlkochtöpfe etwa überdauern Jahrtausende. Auch bestimmte Plastikgeräte überstehen unbeschadet sogar Hunderttausende von Jahren.

Im Folgenden bringen wir Auszüge aus dem Gespräch, das Steve Mirsky von Scientific American mit dem Visionär führte.

Zurück zur Natur: Wenn alle Menschen verschwänden, würde sich Manhattan wieder in eine bewaldete Insel verwandeln. Nach einigen Jahrzehnten stürzen viele Wolkenkratzer ein, da ihre Fundamente unterirdisch von Wasser überflutet werden. Gebäude aus Stein wie die St. Patrick's-Kathedrale halten dem Verfall länger stand. Unkraut und Bäume sprießen aus aufgesprungenen Bürgersteigen. In den Ruinen nisten Raubvögel, und durch die Straßen ziehen Füchse.

Von Alan Weisman

Wenn die Menschen über Nacht verschwänden, würde die markante Skyline von Manhattan nicht lange überdauern. Weisman schildert, wie sich das Betondickicht von New York in einen wirklichen Dschungel verwandeln würde.

Was würde mit all unserem Hab und Gut geschehen, wenn wir nicht mehr da wären? Könnte die Natur unsere Spuren komplett verwischen? Gibt es überhaupt von Menschen angefertigte Objekte, die unzerstörbar und unauslöschlich sind? Könnte die Natur beispielsweise New York wieder in den Urwald zurückverwandeln, den Henry Hudson im Jahr 1609 erstmals zu Gesicht bekam?

Ich habe in New York interessante Gespräche mit Ingenieuren und Wartungspersonal geführt. Wir diskutierten, welchen Aufwand es erfordert, die Natur zurückzudrängen. Ich fand heraus, dass unsere imposante Infrastruktur, die so monumental und unzerstörbar wirkt, tatsächlich auf einigen recht fragilen Konzepten basiert. Sie kann nur deshalb dauernd funktionieren und weiter existieren, weil einige Menschen sich aktiv darum kümmern – im Dienste und zu Gunsten aller.

Der Name »Manhattan« stammt von einer indianischen Bezeichnung für Hügel. Der Ort bezeichnete damals nur eine hügelige Insel. Natürlich wurde die Gegend später eingeebnet, um ein Straßennetz zu errichten. Um diese Hügel flossen rund 40 verschiedene Bäche, Manhattan besaß zahlreiche Quellen. Was geschah mit all dem Wasser? Auf die Insel fällt immer noch genauso viel Regen wie früher, doch es wird nun abgeleitet. Teilweise fließt es durch die Kanalisation, doch ein Abwassersystem ist niemals so effizient wie die Natur selbst. Es gibt daher eine Menge Grundwasser, das unterirdisch fließt und sich einen Weg ins Freie sucht. Selbst an einem sonnigen Tag ohne Regen müssen die Leute, die sich um den U-Bahn-Betrieb kümmern, knapp 50 Millionen Liter Wasser abpumpen. Sonst würden die Tunnel langsam überflutet.

Zuerst fällt der Strom aus

Es gibt in Manhattan Orte, wo diese Teams ständig gegen steigende Untergrundflüsse ankämpfen müssen, weil sonst die Schienen verrosten. Steht man in diesen Pumpenräumen, sieht man riesige Wassermengen hereinströmen. Unterhalb, in einem kleinen Schacht, stehen die Pumpen, die alles wegschaffen. Wenn morgen alle Menschen verschwänden, würde als Erstes der Strom ausfallen. Dieser stammt zumeist aus Kohle- und Kernkraftwerken.

Die Pumpen können sich automatisch abschalten, um zu verhindern, dass Unkontrolliertes passiert, falls niemand mehr die Anlagen überwacht. Fällt der Strom aus, bleiben auch die Pumpen stehen. Fallen die Pumpen aus, füllen sich die U-Bahn-Schächte rasch mit Wasser. Innerhalb von 48 Stunden wären bereits Teile von New York überflutet. Dies würde teils auch oberirdisch sichtbar, da dann die Gullys überlaufen. Sie verstopfen sehr schnell – zuerst mit Plastiktüten, dann mit

DIE GEWINNER ...

Unser Ableben wäre für viele Spezies vorteilhaft. Hier sind einige Tier- und Pflanzenarten aufgelistet, die vom Verschwinden der Menschheit profitieren würden.

- **Vögel:** Ohne Wolkenkratzer und Hochspannungsleitungen, die ihren Flug behindern, würde sich pro Jahr mindestens eine Milliarde Vögel weniger das Genick brechen.
- **Bäume:** New York würde von Eichen und Ahornen erobert, ebenso von schnellwüchsigen chinesischen Ailanthus-Bäumen (Götterbäumen).
- **Mücken:** Da keine Insekten mehr vertilgt werden und sich die Feuchtgebiete ausbreiten, würden ganze Wolken von Mücken über andere Tiere herfallen.
- **Verwilderte Hauskatzen:** Sie könnten vermutlich gut in der menschenlosen Welt überleben, indem sie sich von kleinen Säugetieren und Vögeln ernähren.

WER KOMMT NACH UNS?

Die Natur, heißt es, scheut das Vakuum. Wenn alle Menschen verschwänden, könnten sich dann auch andere Spezies entwickeln, die Werkzeuge benutzen, Getreide anbauen und sprechen? Laut Alan Weisman könnten beispielsweise Paviane diese Rolle übernehmen. Neben dem modernen Menschen haben sie unter den Primaten die größten Gehirne. Als die Wälder schrumpften, haben sich, ähnlich wie wir, auch die Paviane an das Leben in der Savanne angepasst.

Hollywood scheint Weisman in seiner Serie von »Planet der Affen«-Filmen Recht zu geben. Ein zweites »Der Mensch kam aus Afrika«-Szenario könnte sich, hunderttausende Jahre nach dem ersten, erneut abspielen. Man fragt sich, was Pavian-Archäologen der zukünftigen Welt mit den für sie merkwürdigen Relikten der Menschheit – etwa Skulpturen, Essbestecke oder Plastiksäcke – anfangen, die nahe der Oberfläche im Boden vergraben sind. Weisman vermutet, dass »die Entwicklung von Intelligenz jedweder Kreatur, die solche bereits vorgefertigten Werkzeuge ausgräbt, einen abrupten evolutionären Schub gibt«. So könnten wir auch nach unserem Verschwinden noch indirekt die Zukunft beeinflussen.

CORBIS, DAVID KEATON

Laub, weil niemand mehr die Hecken in den Parks schneidet.

Und was geschieht unterirdisch? Alles würde verrosten. Man denke nur an die U-Bahn-Trasse unter der Lexington Avenue. Wer dort auf seine Bahn wartet, blickt auf zahllose Stahlsäulen, die das Dach abstützen, das de facto die Straße bildet. Diese Säulen würden rosten und schließlich einknicken. Nach einiger Zeit, etwa einigen Jahrzehnten, bricht die Straße ein und es bilden sich Krater. Und kurz darauf haben sich einige von Manhattans Straßen wieder in die Bäche zurückverwandelt, die einst über die Insel flossen.

Viele Gebäude in Manhattan sind im Grundgestein verankert. Doch selbst wenn sie Fundamente aus Stahlträgern haben, so sind diese nicht dafür ausgelegt, ständig unter Wasser zu stehen. Daher würden hohe Häuser irgendwann kippen und einstürzen. Außerdem werden mehr Hurrikane über die US-Ostküste hinwegfegen, da der Klimawandel vermehrt für Extremwetterlagen sorgen wird. Sobald ein Gebäude einstürzt, reißt es oft andere mit sich, was eine »Lichtung« schafft. In solchen Lichtungen sammeln sich Samen von Pflanzen, die auch in Risse in den Bürgersteigen eindringen. Vorher schon schlagen sie in Laubabfällen Wurzeln, doch erst der Kalk aus pulverisiertem Zement wird für eine säureärmere Umgebung sorgen, in der einige Pflanzen besser gedeihen.

In jeder Stadt entstehen diverse kleine Ökosysteme. Jedes Frühjahr erwärmt sich eine Seite, während die andere womöglich noch gefroren ist. So bilden sich neue Risse, in die Wasser eindringt und gefriert. Dadurch weiten sich die Risse auf, Samen werden hineingeweht, das entwickelt sich rasch.

Wie würden sich die Ökosysteme auf der Erde verändern, wenn Menschen von der Bildfläche verschwinden? Weisman sagt, wir können einen Blick auf diese hypothetische Welt werfen, wenn wir urzeitliche Relikte studieren, an denen die Menschheit kaum Spuren hinterlassen hat.

Um mir ein Bild zu machen, wie die Welt ohne Menschen aussähe, suchte ich abgelegene Orte auf, die von ihren Einwohnern seit Langem verlassen worden waren. Eine dieser Gegenden ist der letzte urzeitliche Wald Europas. Er entspricht dem, was sich ein Kind vorstellt, dem jemand ein Grimm'sches Märchen vorliest: ein dunkles Dickicht mit heulenden Wölfen, dicht behängt mit Moos, das

Wie die Stadt New York zerfällt

Die Geschichte ihres Verschwindens im Zeitraffer

zwei Tage nach dem Verschwinden der Menschen
Ohne ständiges Abpumpen füllen sich New Yorks U-Bahnschächte komplett mit Wasser.

sieben Tage
Kernreaktoren fangen Feuer oder erleiden eine Kernschmelze, da ihre Kühlsysteme ausfallen.

ein Jahr
In Straßenbelägen bilden sich Risse und Buckel, Wasser strömt in die Risse und weitet sie, wenn es gefriert und wieder auftaut.

zwei bis vier Jahre
In den Großstädten wuchert aus den Rissen in den Straßen Unkraut. Später wachsen dort Bäume, deren Wurzeln die Bürgersteige heben und das bereits geschädigte Kanalisationssystem vollends lahmlegen.

vier Jahre
Die unbeheizten Wohnhäuser und Bürogebäude bekommen im Gefrier-Auftau-Zyklus Risse und beginnen zu zerfallen.

fünf Jahre
Nun sind große Teile New Yorks Feuersbrünsten zum Opfer gefallen. Schlägt ein Blitz in trockenes Reisig ein, wie es dann im Central Park herumliegt, kann sich dies zur Brandkatastrophe auswachsen.

20 Jahre
In Manhattan bilden sich Dutzende von Bächen und Marschen, da abgesackte Straßen sich mit Wasser füllen.

100 Jahre
Die Dächer fast aller Häuser sind eingefallen, was den Verfall der Bausubstanz weiter beschleunigt.

300 Jahre
New Yorks Hängebrücken sind eingestürzt. Bogenbrücken, insbesondere die für Eisenbahnen, könnten jedoch einige Jahrhunderte länger durchhalten.

500 Jahre
Ausgedehnte Wälder überziehen New Yorks ehemaliges Stadtgebiet.

ILLUSTRATIONEN: KENN BROWN UND EMILY HARRISON

... UND DIE VERLIERER

Kein Zweifel: Humanparasiten und unser Vieh würden uns vermissen. Hier findet sich die Liste der Arten, für die unser Verschwinden wahrscheinlich nachteilig wäre.

- **Hausvieh:** Es würde zu einem Festessen für hungrige Berglöwen, Kojoten und andere Raubtiere.
- **Ratten:** Ohne unseren Müll würden sie womöglich verhungern oder von Raubtieren aufgefressen, die in den Hausruinen leben.
- **Kakerlaken:** Ohne geheizte Gebäude können sie die Winter nicht überleben; in klimatisch gemäßigten Regionen würden sie aussterben.
- **Kopfläuse:** Da diese Insekten auf den Menschen spezialisiert sind, würde unser Ableben auch diese Parasiten ausrotten.

von den Bäumen herunterhängt. Diesen Urwald gibt es tatsächlich – an der Grenze zwischen Polen und Weißrussland. Es handelt sich um ein Wildreservat, das im 14. Jahrhundert von einem litauischen Herzog eingerichtet wurde, der später König von Polen wurde.

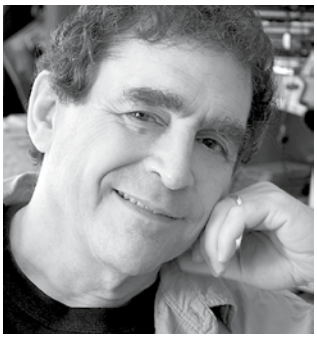
Etliche polnische Könige und russische Zaren nutzten es als privates Jagdrevier. Menschen haben dort kaum Spuren hinterlassen. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde die Gegend zu einem Nationalpark. Zuerst sieht man riesige Bäume, die einem das Gefühl geben, alles sei am rechten Platz. Man steht vor Eichen und Eschen, die 45 Meter hoch und über drei Meter dick sind. Die Furchen in ihren Rinden sind so breit, dass Spechte Tannenzapfen hineinstecken. In diesem Wald leben nicht nur Wölfe und Elche, sondern auch die letzte Herde europäischer Büffel, des *Bison bonasus*.

Ich besuchte auch die demilitarisierte Zone Koreas. Hier gibt es einen kleinen Streifen Land – 240 Kilometer lang und vier Kilometer breit –, der zwei der größten Armeen der Welt voneinander trennt. Zwischen diesen beiden Armeen entstand – ungewollt – ein Wildreservat. Man sieht dort Arten, die vielleicht längst ausgestorben wären, wenn sie nicht diesen Schutzraum hätten. Manchmal hört man, wie Soldaten sich über Lautsprecher anschreien oder ihre jeweilige Propaganda zum Besten geben. Inmitten dieser Spannungen sieht man große Schwärme von Kranichen, die hier überwintern.

Mir wurde klar, dass ich – um eine Welt ohne Menschen wirklich zu verstehen – herausfinden musste, wie die Welt aussah, bevor sich die Menschen evolutionär entwickelt hatten. Also reiste ich nach Afrika – dem Kontinent, wo sich die Menschheit entwickelte und in dessen Wildnis immer noch große Tierarten leben. Auch auf allen anderen Kontinenten und vielen Inseln lebten einst große Tiere. Etwa in Nord- und Südamerika: gigantische Faultiere, größer als Mammuts, dazu Biber, so groß wie Bären. Noch ist unklar, warum sie dort jeweils ausstarben, aber die Indizien deuten auf den Menschen. Auf allen Kontinenten scheint das Aussterben in der Tierwelt mit der Ankunft des Menschen zusammenzufallen. Doch Afrika ist der Ort, wo Tiere und Menschen sich gemeinsam evolutionär entwickelten und die Tiere lernten, den Nachstellungen zu entkommen. Ohne den Menschen würde sich Nordamerika kurzfristig in ein gigantisches Rotwildrevier verwandeln. Auf dem gesamten Kontinent könnten sich die Wälder ausbreiten. Und schließlich würden – im Zuge der Evolution – größere Pflanzenfresser entstehen, die in diesen Wäldern ihr Futter finden könnten. Entsprechend würden sich auch große Fleischfresser entwickeln.

Stellt man sich eine Welt ohne Menschen vor, dann kann man die Umweltprobleme in neuem Licht sehen.

Ich sage nicht, wir müssten uns darüber Sorgen machen, dass die Menschen morgen plötzlich aussterben oder dass uns alle ein Todesstrahl aus dem All auslöscht. Vielmehr fiel mir auf, dass diese Art, unseren Planeten zu betrachten – also uns rein theoretisch als Spezies von der Erde zu verbannen –, so faszinie-



Alan Weisman ist Autor von fünf Büchern, darunter »Die Welt ohne uns – Reise über eine unbevölkerte Erde« (Piper, 2007). Er schreibt für zahlreiche Magazine und unterrichtet an der Universität von Arizona Journalismus.

Ein Podcast des Interviews mit Alan Weisman finden Sie unter www.SciAm.com/ontheweb, siehe unter July 2007.

Weblinks zu diesem Thema: www.spektrum.de/artikel/905471

rend ist, dass sie einige Abwehrreaktionen relativiert. Ich meine das typische schlechte Gewissen, das uns überkommt, wenn wir über Umweltprobleme reden, die wir selbst verursacht haben, oder über die Katastrophen, die uns künftig heimsuchen könnten. Denn, ehrlich gesagt, jedes Mal, wenn wir etwas über diese Themen lesen, befällt uns das Gefühl: Oh Gott, werden wir alle sterben? Kommt jetzt das Ende?

Ein anderer Blick auf die Gegenwart

In meinem Buch widerlege ich solche Bedenken. Wir Menschen sind rein hypothetisch, aus welchem Grund auch immer, verschwunden, und nun sehen wir uns mal an, was ohne uns weiterhin passiert. Es ist wunderbar, all die Endzeitängste zu verbannen. Es ist ein anderer Blick auf die Gegenwart.

Stellen Sie sich vor, wie lange es etwa dauern würde, um einiges von dem zu zerstören, was wir geschaffen haben. Einige unserer Produkte haben eine Lebensdauer, die wir nicht einmal schätzen können, etwa besonders stabile organische Schadstoffe, die als Pestizide oder industrielle Chemikalien ihren Anfang nahmen. Oder bestimmte Plastiksorten, die weit verbreitet sind. Fast alle diese Dinge gab es zu Zeiten des Zweiten Weltkriegs noch nicht. Man beginnt zu ahnen, dass es wohl keine Lösung für diese Probleme gibt, die geologische Dimensionen haben und die von uns zu Lasten der Erde losgetreten wurden. Am Ende meines Buchs erwähne ich die Möglichkeit, dass Menschen weiterhin Teil des künftigen Ökosystems bleiben können – allerdings auf eine Art, die weit besser mit dem Rest unseres Planeten im Gleichgewicht steht als heute.

Ich spreche nicht als Erstes die schrecklichen Dinge an, die wir als Menschheit hervorgebracht haben und die so Furcht erregend sind – etwa Radioaktivität oder Schadstoffe, von denen einige Jahrmillionen überdauern könnten –, sondern die schönen Dinge. Wäre es nicht ein schmerzlicher Verlust, wenn die Menschheit von der Erde verschwände? Was geschieht dann mit unseren größten Errungenschaften in allen Bereichen der Kunst, ob Bilder oder Skulpturen, oder mit den schönsten Gebäuden? Wird es überhaupt noch irgendwelche Anzeichen dafür geben, dass wir einmal hier waren? Das ist die zweite Reaktion, die ich immer von den Leuten erhalte. Erst denken sie, die Welt ohne uns wäre doch wundervoll. Doch dann denken sie: Aber wäre es nicht doch schade, wenn es uns nicht mehr gäbe? Ich glaube nicht, dass wir verschwinden müssen, um einen harmonischeren Zustand zu erreichen. ◁

5000 Jahre
Die Ummantelungen nuklearer Sprengköpfe verrosten, radioaktives Plutonium-239 gelangt in die Umwelt.

über 15 000 Jahre
Die letzten Überreste von Manhattans Gebäuden fallen herannahenden Gletschern der nächsten Eiszeit zum Opfer.

ILLUSTRATION OBEN: KENN BROWN; UNTEN: JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

35 000 Jahre
Blei von Autoabgasen des 20. Jahrhunderts, das sich im Boden abgelagert hatte, dringt in die Atmosphäre.

100 000 Jahre
Der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre erreicht wieder vorindustrielles Niveau.

zehn Millionen Jahre
Als letzte Zeugnisse der Menschheit existieren Bronzeskulpturen, die größtenteils noch ihre Form behalten haben.

eine Milliarde Jahre
Da die Sonne intensiver strahlt, heizt sich die Erde verstärkt auf. Insekten und einige andere Tiere könnten sich jedoch daran anpassen.

ILLUSTRATION OBEN: PAT RAWLINGS; UNTEN: RON MILLER

fünf Milliarden Jahre
Die Erdoberfläche verbrennt und alle Gewässer verdampfen, da unsere sterbende Sonne expandiert und sich dabei die inneren Planeten des Sonnensystems, Merkur und Venus, einverleibt.

Billionen von Jahren
Fernsehsendungen eilen als interstellare Botschaften von der Erde weiterhin durchs Weltall, wenn auch schwächer werdend.

EVERETT COLLECTION

Ein Brandbekämpfer beobachtet ein Feuer im US-Bundesstaat Washington.

KAREN WATTENMAKER

Bessere Vorhersagen von Waldbränden

Die verheerenden Feuersbrünste in Griechenland, Italien und auf dem Balkan in diesem Sommer haben es gezeigt: Heute brennen mehr Flächen ab als jemals zuvor. Wo werden die nächsten Brände ausbrechen? Können wir sie verhindern – und wenn ja, sollen wir das überhaupt?

Von Patricia Andrews, Mark Finney und Mark Fischetti

Die Zahl der katastrophalen Wald- und Flächenbrände in den USA nimmt stetig zu. In acht der letzten zehn Jahre gab das Land jeweils mehr als eine Milliarde Dollar aus, um die Feuer einzudämmen. 2005 standen 3,5 Millionen Hektar in Flammen, ein Rekord, der 2006 mit vier Millionen Hektar wieder übertroffen wurde. Das Jahr 2007 hat uns erneut rekordverdächtige Feuerschäden beschert: mit zehn Prozent mehr Bränden, die etwa 40 Prozent mehr Flächen vernichteten.

Die steigende Zahl der Feuer ist vorwiegend auf die Zunahme von brennbarem Material zurückzuführen, insbesondere von Reisig und Unterholz. In den Wäldern gibt es davon mehr als je zuvor, weil die zuständigen Behörden – einschließlich der Nationalen Forstverwaltung der USA – eine Politik verfolgten, die das Ziel hatte, jedes ausgebrochene Feuer zu löschen. Brände beseitigen aber auch die Überreste von Pflanzen. Dadurch häufen sich erst gar nicht größere Mengen brennbaren Materials auf größeren Flächen an, das große Feuer nähren könnte.

Doch unabhängig von einer solchen Politik fühlt sich die Feuerwehr vielfach genötigt Brände zu bekämpfen. Denn nach wie vor werden Häuser in bislang unbewohnten Gebieten errichtet, die dann geschützt werden müssen. Verschärft wird das Problem dadurch, dass die Schneeschmelze im Frühjahr zuletzt zeitiger einsetzte und sich so die Anzahl der Wochen pro Jahr erhöhte, in denen die Wälder schneefrei und damit oft gefährlich trocken waren.

Selbstverständlich muss der Nachschub an brennbarem Material reduziert werden, indem man einigen von selbst entstandenen Feuern erlaubt sich auszubrennen und indem man sogar gezielt Brände legt. In von Natur aus relativ trockenen Gebieten, wie in Teilen der USA, ist Feuer für das ökologische Gleichgewicht unerlässlich. Die Vegetation ist dort an natürliche Brände angepasst und benötigt sie sogar. Wenn Wald- und Flächenbrände entweder völlig ausbleiben oder im anderen Extremfall katastrophale Ausmaße annehmen, verändern sich Ökosysteme drastisch, die seit Jahrtausenden von regelmäßigen Bränden profitieren.

Bekämpfung der Borkenkäfer

Sie werden anfällig für eine totale Vernichtung durch Krankheit oder Insektenfraß. Die so genannten Sky Islands in Arizona – bewaldete Gipfel, die wie Inseln aus der Wüste herausragen – sind auf diese Weise schon verloren gegangen. Und wunderschöne alte Lodgepole-Kiefernwälder in Colorado gingen durch Borkenkäferfraß zu Grunde. Normalerweise hätten Brände die Zahl dieser Schädlinge in Grenzen gehalten.

Leider lässt sich nur schwer sagen, wie viel brennbares Material entfernt werden muss, um das Risiko extrem starker Brände zu senken – und wie das effizient geschehen kann. Außerdem: Wann sollten Feuer am besten gelegt werden, um all das Reisig und Unterholz zu beseitigen? In welchen Fällen sollte die Feuerwehr frisch entfachte Feuer einfach brennen lassen? Um solche Fragen anzugehen, benötigen Politiker, Behörden

In Kürze

- **Brennbares Material** häuft sich in den Wäldern an, da die Behörden sich jahrzehntelang bemüht haben, fast alle Brände zu löschen. Die Menge von Totholz und Pflanzenresten auf großen, zusammenhängenden Flächen führt zu riesigen, unlöschbaren Bränden.
- **Computermodelle** prognostizieren, wie ein aktuelles Feuer brennen wird. Sie können immer genauer vorhersagen, welche Gebiete künftig für Waldbrände am anfälligsten sind.
- **Die Modelle helfen** den Brandschützern, schneller vor Ort zu sein. Auch lernen sie, Waldbestände vorab auszudünnen oder manche Feuer weiterbrennen lassen.

SPOTFIRE IMAGES, MIKE MCMILLAN

Ein Löschflugzeug wirft rund zehn Tonnen Feuerschutzmittel über einem Brandherd in Colorado ab.

und Feuerwehr Unterstützung, die es ihnen ermöglicht, ihre Handlungsoptionen zu testen. In den letzten fünf Jahren hat die Forschung Computermodelle deutlich verbessert, die simulieren, wie sich Brände verhalten und wie die Feuerwehr am besten damit umgeht. Waldbrandexperten, Klimatologen und Softwarespezialisten entwickeln auch Szenarien, die detailliert vorhersagen können, auf welchen Flächen es innerhalb der nächsten Woche, in der nächsten Waldbrandsaison oder in den kommenden Jahren brennen wird.

Es mag unmöglich erscheinen, mit Hilfe eines Simulationsprogramms zu prognostizieren, wie sich ein Feuer in einem Wald ausbreiten wird. Die Anzahl der relevanten Variablen ist in der Tat entmutigend: Sorten von Totholz, Aststrukturen der Bäume, Gelände, Wetter, Feuchtigkeitsgehalt der lebenden Blätter, Feuchtigkeitsgehalt toter Gräser und Zweige (der sich von Stunde zu Stunde ändern kann) und vieles mehr. Um herauszufinden, wie die Ausbreitung eines Brands unter Kontrolle gehalten werden kann, sind sogar noch mehr Rechengrößen im Spiel: Windgeschwindigkeit, Hangneigung, das aktuelle Wetter. Außerdem sind die möglichen Auswirkungen von Brandbekämpfungsmaßnahmen zu simulieren, wie etwa der Abwurf von Feuerschutzmittel aus der Luft oder das Umpflügen von Flächen, um Brandschneisen zu schaffen, die von Flammen nur schwer zu überspringen sind.

Trotz dieser Schwierigkeiten werden Computermodelle, die vorhersagen, wie sich ein bereits ausgebrochener Waldbrand ausbreiten wird, immer ausgefeilter. Das hilft den Feuerwehren womöglich, das Leben von Anwohnern zu retten. Damit können sie die Kosten für die Bekämpfung derjenigen Brände reduzieren, die sich nicht unterdrücken lassen. Einige der neuen Modelle werden seit 2006 herangezogen, um konkret den Einsatz von Feuerwehrteams und Geräten zu planen.

Technisch gesehen basiert solch ein Modell auf einem Satz von Algorithmen, der eine bestimmte physikalische Eigenschaft eines Feuers beschreibt, etwa die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammen. Kombiniert man diese Algorithmen, entsteht daraus ein Waldbrand-Vorhersage-Modell, das die Brandschützer benutzen, um damit Karten und Prognosen zu erstellen. In der Umgangssprache heißen diese Systeme ebenfalls Modelle und so werden wir diesen Ausdruck im Folgenden verwenden.

1976 begannen Brandschutzexperten, die unmittelbar in der Nähe der Brandstellen arbeiteten, mit Hilfe von Tabellen und Grafiken – so genannten Nomogrammen – die Intensität eines Feuers, seine Geschwindigkeit und die Ausbreitungssrichtung vorherzusagen. Diese Prognosen basierten auf Art und Feuchtigkeit des brennbaren Materials vor Ort sowie auf Windgeschwindigkeit und Hangneigung. (Ein Feuer breitet sich den Hang hinauf viel schneller aus als etwa im ebenen Gelände.) Die Analytiker übertragen die Ergebnisse als Vektoren auf topografische Karten, um sie den Feuerwehrleuten zu zeigen. Natürlich werden Expertenaussagen und manuelle Berechnungsmethoden vor Ort weiterhin im Einsatz bleiben. Doch die Computersoftware entwickelt sich zur willkommenen Zusatzhilfe.

Unser Programm sagt gut vorher, wo und wie schnell sich die Flammen ausbreiten werden

Simulationen für jedes Wetter

Der von einem von uns (Finney) entwickelte Waldbrandgebiets-Simulator Farsite stützt sich auf ähnliche Eingaben, berechnet aber auch, wo und wie schnell sich ein Feuer ausbreiten kann. Ein Brandexperte gibt die gegenwärtige Position eines Brands in einen Laptop ein, dazu Daten über brennbares Material, Gelände und die Wettervorhersage. Farsite liefert dann Grafiken, die das Wachstum der Feuersbrunst im Verlauf der nächsten ein bis drei Tage darstellen. Diese Information hilft den Einsatzleitern der Feuerwehr bei ihrer Entscheidung, welche Löschaktionen am meisten Erfolg versprechen.

Große Wald- und Flächenbrände dauern jedoch oft weit länger als drei Tage. Für die Entscheidung, wo Teams und Geräte einzusetzen sind, wird eine längerfristige Vorhersage benötigt. Zu diesem Zweck entwickelte Finney das Programm FSPro (*fire spread probabi-*

lities, wahrscheinliche Feuerausbreitung). 2006 sollte es zunächst nur probeweise bei wenigen Bränden laufen. Doch dann brachen im Verlauf der Saison so viele Feuer aus, dass die Brandbekämpfer FSPro schließlich gleich für über 70 Bränden benutzten. Das Modell berechnet, wohin sich ein Feuer wahrscheinlich ausbreiten wird, indem es Tausende von Farsite-Simulationen durchläuft, jeweils für unterschiedliche Wetterverläufe, die auf Grund der Vorgeschichte des Gebiets denkbar sind. Vorhersagen sind für einen Zeitraum von 30 Tagen möglich. Ob ein Feuer mit 20 oder 80 Prozent Wahrscheinlichkeit eine Ortschaft erreicht könnte, beeinflusst nicht nur die Arbeit der Feuerwehr, sondern auch die Entscheidung, ob Anwohner evakuiert werden sollen. Im Allgemeinen sagte FSPro gut vorher, wo und wie schnell sich die Flammen ausbreiten und wie hoch die Temperaturen steigen werden. Viele Feuerwehrleute fanden das Modell außerordentlich hilfreich. Einige sagten allerdings, es neigte dazu, die tatsächliche Ausdehnung der Brände zu überschätzen.

FSPro spielt Tausende von Szenarien durch. 2006 ließ das Fire Sciences Laboratory

Wie wird sich das Feuer ausbreiten?

Gewitterblitze entfachten im Juli 2006 im Shasta-Trinity-Nationalforst im Norden Kaliforniens zahlreiche Waldbrände. Feuerwehren traten in Aktion. Joe Millar, der für die Brandbekämpfung dort zuständige Beamte, ahnte rasch, dass vier oder fünf der Brände drohten, sich weiter auszubreiten. Er versuchte die Wahrscheinlichkeit für diesen Fall abzuschätzen. Wo sollte die Feuerwehr ihre Bemühungen konzentrieren?

Joe Millar rief Barnie Bahro an, einen regionalen Verbindungsmann zu verschiedenen Behörden. Dieser wiederum kontaktierte Mark Finney vom Fire Sciences Laboratory in Missoula, Montana. Um auf potenziell gefährliche Brände vorbereitet zu sein, bat Bahro Finney, das Programm FSPro (*fire spread probabilities*, wahrscheinliche Feuerausbreitung) zu starten – ein neues Programm, das vorhersagt, wo und wann ein Waldbrand entsteht. »Wir haben die Wetteraufzeichnungen der letzten 20 Jahre, Winddaten der letzten zehn Jahre und die Daten über die Anhäufung potenziellen Brennmaterials im Wald«, sagt Bahro – also die Informationen, die FSPro benötigte. »Wir mussten nur Marks Computer damit füttern.«

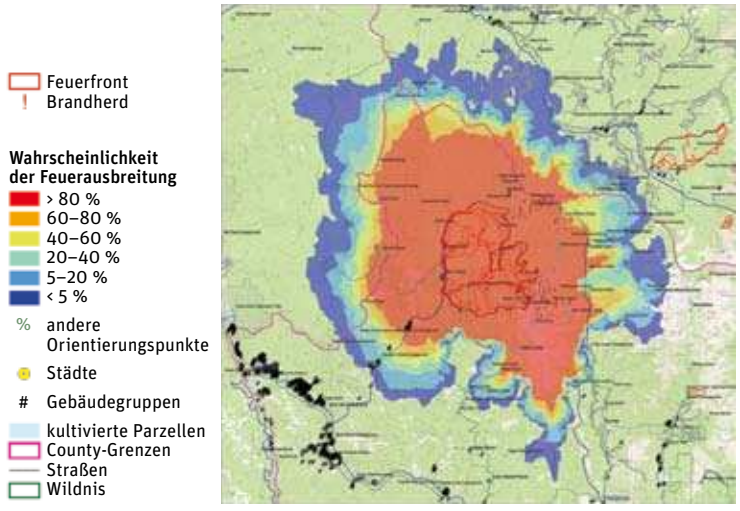
Während Finney die Software laufen ließ, lieferten die örtlichen Einsatzleiter bereits erste Berichte über die Verbreitung der Brände. Vom nächsten Tag an erhielt Millar per E-Mail Landkarten von Finney, die zeigten, wo das Feuer am wahrscheinlichsten um sich greifen würden. Inzwischen hatten sechs Brände bereits eine solche Größe erreicht, dass man ihnen Namen gab. Sie brannten unmittelbar nördlich und westlich des Hauptsitzes der Forstverwaltung in Redding, Kalifornien, wo Millar sich gerade aufhielt. »Die Simulationen halfen mir bei der Orientierung«, sagt Millar. »Sie halfen mir bei der Entscheidung, jeweils ein Feuerwehrteam zu bestimmten Gefahrenherden abzustellen.« Bei diesen war die Gefahr am größten, dass sie sich zu großflächigen, länger anhaltenden Bränden entwickelten.

Bahro und Millar hatten Finney und seinen Kollegen Dave Calkin auch gebeten, ein weiteres Modell laufen zu lassen, das so genannte Rapid Assessment of Values at Risk (rasche Bewertung bedrohter Sachwerte). Dieses Modell weist auf Gebäude und Anlagen sowie auf bedrohte Lebensräume hin, schätzt ihren Wert und stellt so fest, wo die höchsten finanziellen Schäden entstehen würden. »Praktisch von Anfang an hatten wir Teams im Einsatz, die versuchten, einen bestimmten Brandherd von Privatgrundstücken fernzuhalten«, sagt Millar. »Doch als sich ein anderes Feuer ausweitete, verlagerten wir mehr Kräfte dorthin, weil wir sahen, dass dort wichtige Stromleitungen und eine große Versorgungspipeline bedroht waren.«

Wenige Wochen später hatte die Feuerwehr einige der Brände eingedämmt, andere hielten sich jedoch hartnäckig. Finney brachte die Computersimulationen auf den letzten Stand, als die Teams aktuelle Daten übermittelten. Die Rechenläufe halfen Bahro und Millar bei der Entscheidung, wie sie die Teams koordinieren und Großgerät richtig einsetzen sollten. Am 29. August meldete FSPro, dass die inzwischen vereinten Brände, die jetzt Big-Bar-Komplex genannt wurden (siehe Grafik), eine Fläche von 116 000 Hektar verwüsten konnten, darunter reizvolle Flusslandschaften, Lebensräume von Lachsen sowie ein indianisches Stammesgebiet. Durch die Verlagerung von Löschmanschaften konnten Millar und Bahro die Schadensfläche jedoch auf 42 000 Hektar begrenzen. Millar betont, dass die Aktionen nicht von den Simulationen diktiert wurden: »Wir müssen Entscheidungen immer noch auf Grund dessen fällen, was die Brandbekämpfer vor Ort beobachten. Doch FSPro zeigte uns, wohin sich das Feuer tendenziell ausbreiten wollte.«

Mark Fischetti

Ausbreitungssimulation des Big-Bar-Komplex-Feuers am 29. August 2006



Simulationen mit FSPro halfen den Feuerwehr-Einsatzleitern, die Brandkatastrophe frühzeitiger einzudämmen.

(Labor für Waldbrandforschung) in Missoula, Montana, unter Aufsicht der Forschungsabteilung des US-Forest Service, der US-Forstverwaltung, das Modell für 70 Brände laufen und schickte den Feuerwehren vor Ort genaue Karten. Bis September 2007 konnten 40 Experten inzwischen auch die Online-Version von FSPro für rund tausend Brände einsetzen. Seitdem geben autorisierte Experten ihre Daten direkt ins Internet ein und rufen dort die damit erstellten Karten ab.

FSPro wird sich in dem Maße verbessern, wie die Forscher ihre zu Grunde liegenden physikalischen Modelle verfeinern. Beispielsweise können Experten erst jetzt brauchbare Simulationen von Wipfelfeuern erstellen – Feuer, die sich nicht am Boden, sondern durch das Kronendach eines Waldes fressen. Wenig erforscht ist auch, warum sich ein Bodenfeuer plötzlich in ein Wipfelfeuer verwandelt. Diese Transformation kann innerhalb weniger Minuten erfolgen und ist sehr gefährlich. Denn dabei können Feuerwehrleute leicht in eine Falle unter dem Feuer geraten, der schwer zu entkommen ist.

Erstmal mit Füßen austreten

Den besten Erfolg, einen Brand zu löschen, haben Feuerwehrleute, wenn sie ihn noch mit den Füßen austreten können. Derart rasches Handeln ist viel eher möglich, wenn die Verantwortlichen ungefähr wissen, wo das nächste Feuer ausbrechen könnte. Dann können sie die Löscheinheiten rechtzeitig dort positionieren – und auch die Öffentlichkeit auf die erhöhte Gefährdung hinweisen.

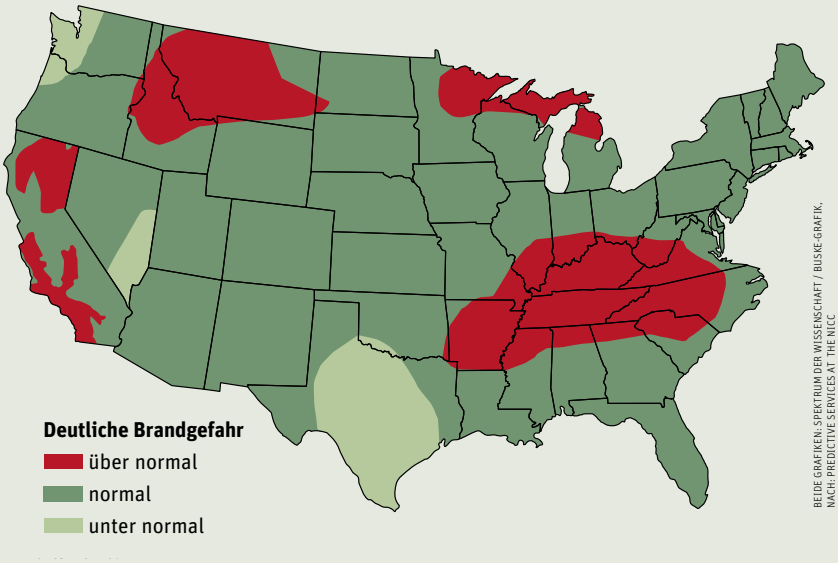
Modelle, die die Brandgefahr für die kommende Woche in einem bestimmten Wald oder Grasland vorhersagen, berücksichtigen zunächst den Feuchtigkeitsgehalt des brennbaren Materials. Dieser verändert sich bei Gras und Nadelstreu natürlich täglich mit den Wetterverhältnissen. Bei Baumstämmen und lebenden Blättern variiert er nur allmählich über Wochen und Monate hinweg.

In den USA begannen Wissenschaftler bereits 1916 mit der Vorhersage der Waldbrandgefahr. Sie stützten sich dabei vorwiegend auf Augenzeugenberichte und die Ratschläge erfahrener Experten. Mit Hilfe mathematischer Modelle wurde 1972 das National Fire Danger Rating System geschaffen (NFDRS, Nationales Bewertungssystem der Feuergefahr) und seither immer wieder verbessert. Neben anderen Anwendungen benutzen Forstplaner und die Ranger der National- und Naturparks diese Bewertungen der Feuergefahr, um die Öffentlichkeit auf das Waldbrandrisiko an bestimmten Tagen aufmerksam zu machen. Solche Information wird häufig durch die in den USA vertrauten »Smokey Bear«-Zeichen (Smokey Bear ist ein Schwarzbär mit Ranger-Hut und Jeans) kommuniziert. Diese geben Gefahrenstufen an, von »gering« bis »sehr hoch«.

Die heutigen Bewertungen vom NFDRS für die Feuergefahr werden als Karten im Wildland Fire Assessment System (WFAS, Bewertungssystem für Freilandfeuer) erstellt, das

Wo wird das nächste Feuer ausbrechen?

Nationale Brandrisiko-Bewertung der USA für die Woche vom 27. April 2007



BEIDE GRAFIKEN: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH: PREDICTIVE SERVICES AT THE NICC

Ende April 2007 machten sich Einsatzleiter der Brandbekämpfung des Florida Interagency Coordination Center, dem lokalen Koordinationszentrum, Sorgen, dass im Nordosten ihres Bundesstaats Waldbrände aufflackern könnten. Eine ungewöhnlich lange anhaltende Dürre hatte Blätter und Gräser stark ausgetrocknet. Die US-Forstverwaltung hatte gerade die wöchentliche Waldbrandgefahrenkarte des WFAS (*wildland fire assessment system*, Bewertungssystem für Freilandfeuer) herausgegeben, die ein hohes Brandrisiko für die Region anzeigte (siehe Karte).

Verschiedene kleinere Feuer loderten bereits und die Einsatzleiter stellten fest, dass sie für den Fall weiterer Brände nicht genügend Mittel haben würden, um diese zu bekämpfen. Ein zusätzliches Löschflugzeug wurde gebraucht, doch landesweit waren nur 18 Löschflugzeuge im Einsatz. Die Staaten im Südwesten der USA konnten keine entbehren, da mittels WFAS für sie ebenfalls ein hohes Risiko festgestellt worden war.

Am 25. April forderten Floridas Brandschützer ein weiteres Löschflugzeug an. Ihre Bitte erreichte das Nationale Koordinationszentrum in Boise, Idaho. Die Aufsichtsbeamten in Boise schauten sich ebenfalls die WFAS-Karten an, hielten Rücksprache mit Experten in Kalifornien, wo das Brandrisiko gering war und ein Flugzeug bereitstand. Es startete am 27. April und erreicht am nächsten Tag Florida.

Die Verlagerung war zeitlich gut geplant. In den folgenden zwei Wochen entzündeten sich in Floridas staatlichen Wäldern 17 neue Brände. Doch keiner von ihnen nahm größere Ausmaße an, da die Feuerwehr sich rechtzeitig um sie kümmern konnte. Laut Matt Jolly vom Fire Sciences Laboratory in Missoula, Montana, der die Details für diesen Bericht lieferte, war dies nur möglich dank der Hilfe aus der Luft. Einsatzleiter der Feuerwehr nutzten überall im Land Computersimulationen, um Teams und Material laufend zu verschieben. *Mark Fischetti*

am Missoula-Labor entwickelt wurde. Das WFAS erhält täglich automatisch Informationen von über 1800 Feuer-Wetter-Stationen, die sich über die gesamten Vereinigten Staaten verteilen. Sie registrieren alle meteorologischen Daten, die für das Brandrisiko von Belang sind, wie Feuchtigkeit oder Windgeschwindigkeit. Das System berechnet daraus die Gefahrenindizes und liefert für das gesamte Land detaillierte, farbig gestaltete Karten.

Steigt das Risiko für eine bestimmte Region deutlich an, dann können Landschaftsplaner oder örtliche Verantwortliche auch zu besonderen Maßnahmen greifen. So können sie Wälder für die Öffentlichkeit sperren oder regional den Verkauf von Feuerwerkskörpern untersagen. Auf Grundlage der WFAS-Karten sind die Einsatzleiter in der Lage vor Ort zu entscheiden, wohin sie ihre Kräfte schicken oder ob diese auch am Wochenende in Bereitschaft bleiben. Als im April 2006 die Brandgefahr im Norden Floridas extrem zunahm, ließen Bundesbeamte ein Löschflugzeug aus einer weniger gefährdeten Region im Norden Kaliforniens einfliegen. Dieses Löschflugzeug leistete dann entscheidende Hilfe, als wenige Tage danach ein Waldbrand ausbrach (siehe Kasten auf der linken Seite).

Die Stationierung von Feuerwehren und Material ist teuer. Außerdem ärgern sich – obwohl die Öffentlichkeit gerne behauptet, die Waldbrandvorsorge zu unterstützen – Jäger, Fischer und Urlauber oft darüber, wenn sie bestimmte Wälder nicht betreten dürfen.

Zutrittsverbote für Touristen

Auch können den örtlichen Geschäften und Hotels so Einnahmen entgehen. Aus diesen und anderen Gründen versuchen Forscher die Genauigkeit von WFAS zu verbessern. Das betrifft auch die Feuer-Wetter-Stationen. Da sie sehr ungleich über das Land verteilt sind, können die Karten, die auf Grund ihrer Daten erstellt werden, nur für einige Gebiete die Bedingungen zuverlässig wiedergeben.

In anderen Gebieten liegen sie hingegen manchmal stark daneben. Deshalb will das WFAS ab diesem Jahr aktuelle Wetterdaten von den in der Regel an Flughäfen stationierten Messstationen des Nationalen Wetterdienstes der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, Wetter- und Ozeanografiebehörde) herunterladen. Außerdem wird es die Wettervorhersagemodelle der NOAA mit verwenden. Mit den Informationen wird das WFAS landesweit eine genauere Bewertung der Brandgefahren für Punkte erstellen, die jeweils acht Kilometer voneinander entfernt sind. Das System benutzt Satellitendaten, um den Feuchtigkeitsgehalt lebender Vegetation zu ermitteln. Es soll künftig auch hochauflösende Spektralinformationen eines Nasa-Satelliten mit verarbeiten können.

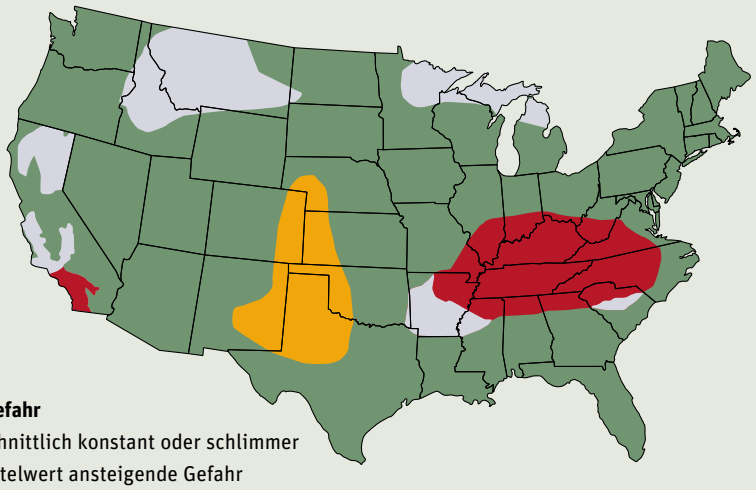
Jedem Fortschritt zum Trotz wird es dennoch immer Waldbrände geben. In der Praxis stellt sich die Frage, ob ein bestimmtes Gebiet mehr Ausrüstung benötigen wird, um Menschen und Umwelt zu schützen.

Derzeit geben Meteorologen für das Verhalten von Feuer über die Vorhersagedienste des National Interagency Coordination Center (NICC, Nationales Koordinationszentrum) in Boise, Idaho, Karten heraus, die zeigen, wo innerhalb der nächsten Woche, des nächsten Monats und der gesamten Saison das Brandrisiko besonders hoch sein wird. Diese Karten basieren zwar auf den WFAS-Daten, müssen aber auch weitere Faktoren berücksichtigen. So können, wenn der Boden über einen längeren Zeitraum hinweg ausgedörrt ist, auch die Bäume ausgetrocknet sein.

Im Westen der USA kann ein trockenes Frühjahr mit dünner Schneedecke einer heftigen Waldbrandsaison im Sommer den Weg ebnen. Regnet es hingegen im Mittel alle zehn Tage einmal, dann werden weit weniger Feuer als im Durchschnitt ausbrechen. Letztlich ließen sich Waldbrände nur dann noch zuverlässiger vorhersagen, wenn man auch das Wetter auf Monate hinaus vorhersagen könnte, was

Brandgefährdete Regionen in den USA

Vorhersagezeitraum: Oktober bis Dezember 2007



Deutliche Brandgefahr

- überdurchschnittlich konstant oder schlimmer
- über den Mittelwert ansteigende Gefahr
- unter den Mittelwert fallende Gefahr

Die Landkarte mit den Prognosen für höchste Brandgefährdungen, herausgegeben vom Vorhersagedienst des NICC, zeigte die höchste Wahrscheinlichkeit für Waldbrände im Herbst 2007 vor allem im Südwesten der USA, die zudem früher als gewöhnlich einsetzen sollten. Die Landkarten werden monatlich inklusive einer aktualisierten Langzeitprojektion erstellt.

WALDBRAND-SCHÄDEN

Verbrannte Fläche in den USA (in Hektar)

2006: 4,0 Millionen
2005: 3,5 Millionen
2004: 3,2 Millionen
2003: 1,6 Millionen
2002: 2,9 Millionen

BRANDBEKÄMPFUNG

Feuerwehrleute, die Waldbrände bekämpfen, werden kreuz und quer durch die USA geschickt, immer dorthin, wo sie gerade gebraucht werden.

513 Einheiten zu je 20 Personen (entspricht 10 260 Feuerwehrleuten)

446 Feuerspringer (»Smokejumper«), die mit Fallschirmen zur Bekämpfung abspringen

87 Helikopter

18 Löschflugzeuge

aber nicht möglich ist. Die Vorhersagedienste konzentrieren sich daher auf die potenziellen Auswirkungen verschiedener Witterungsverläufe. Sie treffen sich jeden Januar mit Klimatologen und anderen Experten, um regionale Bewertungen für die Gebiete im Osten, Süden und Südwesten des Landes zu erstellen. Die Gruppe setzt sich dann erneut Anfang April zusammen, um Schätzungen für die Region im Westen und für Alaska abzugeben.

Diese Bewertungen gehen in die Computermodelle ebenso ein wie Daten über Dürren, saisonale Wetterphänomene wie El Niño oder La Niña – beide ändern die vorherrschende Windrichtung. Eine Rolle spielen auch historische Daten, die zeigen, wie viele stärkere Waldbrände unter bestimmten klimatischen Bedingungen auftraten. So entstehen schließlich aussagekräftige Vorhersagekarten für die Feuergefährdung.

Sie verzeichnen Gebiete, in denen Waldbrände wahrscheinlich Ressourcen an Feuerwehren und Material erfordern werden, die über die üblichen Mittel hinausgehen. 2007 war damit für große Teile des Südwestens und im äußersten Südosten der USA ein besonders hohes Risiko vorhergesagt worden – zu Recht (siehe Kasten S. 92).

Gefährliche frühe Schneeschmelze

Jedes Jahr überlegen die Teilnehmer auch, wie zusätzliche Informationen aufgenommen werden können – etwa Daten, die Anthony Westerling und seine Mitarbeiter 2006 veröffentlicht hatten. Der Brandforscher war damals am Scripps-Institut für Ozeanografie tätig. Seine Gruppe trug Informationen von 1166 Waldbränden zusammen, die sich zwischen 1970 und 2003 im Westen der USA ereignet hatten. Außerdem ermittelten sie die Zeitpunkte der Schneeschmelze sowie Frühjahrs- und Sommertemperaturen der fraglichen Jahre.

In ihrer Studie kamen sie zu dem Ergebnis, eine zeitigere Schneeschmelze im Frühjahr in den Gebirgsregionen sei der bestimmende Faktor für die Prognose, wo Waldbrände überdurchschnittlich häufig ausbrechen sollten. Der praktische Nutzen von Computermodellen zur Brandprognose zeigt sich auf

Klügere Strategien könnten die Zahl der Katastrophen senken

SPOTFIRE IMAGES, MIKE MCMILLAN

Feuerwehrmänner legen im Nationalwald Los Padres (Kalifornien) ein künstliches Feuer.

Trotz ständig verbesserter Technologien zur Brandbekämpfung erreichen in den USA die Hektarzahlen der verbrannten Flächen weiterhin Rekordhöhen. Dies liegt zum Teil an Entscheidungen der Vergangenheit, insbesondere an der Strategie, stets so viele Feuer wie möglich zu löschen.

Seit Jahrzehnten versuchen Forscher die Politiker darüber aufzuklären, dass das Ersticken sämtlicher Feuer den paradoxen Effekt hat, künftige Brände größer und heißer werden zu lassen. Wenn Feuer nicht brennen dürfen, sammelt sich auf großen, zusammenhängenden Flächen brennbares Material an. Reisig stapelt sich auf, Unterholz und junge Bäume bilden ein Dickicht und Baumkronen werden dicht. Wenn sich dann ein Feuer entzündet, sind riesige Mengen brennbaren Materials derart angehäuft, dass keine noch so gut ausgerüstete Feuerwehr mehr in der Lage ist, den Brand unter Kontrolle zu bringen – mit schwer wiegenden Folgen.

Eine solche Politik zu verändern ist jedoch schwierig, weil die Lösung darin liegt, mehr und nicht weniger Brände zuzulassen. Um die verheerendsten Brände zu vermeiden, sollte also ein vorurteilsfreier Ansatz von den zahlreichen Behörden in Betracht gezogen werden, die das Freiland verwalten: die Verwaltungen für Forst, Nationalparks, Fisch und Wildtiere, Landplanung, indianische Angelegenheiten sowie deren Entsprechungen auf Bundesstaatenebene. Obwohl die »Federal Wildland Fire Management Policy« von 1995 akzeptiert, dass die vollständige Unterdrückung von Feuer Nachteile bringt, liefert sie doch keine einfachen Abhilfen.

Drei hauptsächliche Veränderungen sind zu fordern. Erstens sollte es bestimmten Bränden, die auf natürliche Weise entstehen, oder zumindest Teilen von ihnen erlaubt sein auszubrennen. Die Feuerwehr würde Einrichtungen wie Häuser, Stromleitungen und Wassereinzugsgebiete schützen. Aber in anderen Bereichen würden die Flammen sich austoben dürfen.

Zweitens sollten mehr Flächen gezielt abgebrannt werden. Obwohl diese Maßnahme heute schon in gewissem Maß durchgeführt wird, müssen mehr Feuer auf größeren Flächen gelegt werden, speziell in Ökosystemen, die vom Feuer abhängen, und auf Land in der Nähe kultivierter Zonen, wo Waldbrände eine erhöhte Gefahr darstellen.

Drittens muss ein Teil des Unterholzes in Gegenden, wo Menschen leben und arbeiten, beseitigt werden. Die Ironie dabei ist, dass dazu der Widerstand von Umweltschützern zu überwinden ist, die befürchten, dass die geplante Ausdünnung ein verdeckter Versuch sein könnte, die Abholzung zu steigern.

Mark Fischetti

Feuersbrünste über Europa

Auch in Deutschland erhöht der Klimawandel die Gefahr von Waldbränden. Simulationen zur Vorhersage werden jedoch noch nicht eingesetzt.

In den Sommermonaten fegten verheerende Feuer über viele Länder des Mittelmeerraums. Teilweise mussten die Löschkräfte gleichzeitig über tausend Brandherde täglich bekämpfen. Nach Angabe der Gemeinsamen EU-Forschungsstelle für Umwelt und Nachhaltigkeit IES in Ispra, Italien, war der Juli 2007 der schlimmste Monat seit Aufzeichnung der Daten. Betroffen waren unter anderem Bulgarien, Kroatien, Italien, die Iberische Halbinsel und die Kanaren. Besonders hart traf es Griechenland. Dort kamen mindestens 60 Menschen ums Leben. Bis Ende August vernichteten die Feuersbrünste in 14 Staaten insgesamt ein Gebiet von über 8000 Quadratkilometern. Gut zwei Drittel der Brände fraßen sich durch Waldgebiete – zum Teil mit Geschwindigkeiten von mehreren Metern pro Minute. Schätzungsweise sieben Millionen Tonnen an Biomasse verkokelten. Zwölf Millionen Tonnen des Treibhausgases Kohlendioxid gelangten so in die Atmosphäre.

Trotz Warnungen des IES nahmen die Feuer derart gewaltige Ausmaße an. Der Hauptgrund: Nach Schätzungen von Experten gehen über 90 Prozent der Brände auf menschliche Ursachen zurück – sie wurden fahrlässig oder vorsätzlich ausgelöst.

Überraschend kommen nur die wenigsten Waldbrände. Vom 1. Mai bis zum 31. Oktober besteht bei den nationalen Behörden und Feuerwehren erhöhte Aufmerksamkeit; von Juni bis September ist Hochsaison für Waldbrände. Bei der Einschätzung der Gefahr hilft das Europäische Forest Fire Information System (Effis). Es stützt sich auf Satellitendaten. Seit 2003 zeigt es mit einer räumlichen Auflösung von rund 40 Kilometern, wo in Europa oder im Mittelmeerraum Brandgefahr droht – und das bis zu drei Tagen im Voraus. Der Index kennt die Stufen 1 (oder grün) bis 5 (oder rot), die eine sehr geringe bis sehr hohe Gefahr für das Ausbrechen von Waldbränden signalisieren. Sie ergeben sich aus meteorologischen Daten sowie aus dem Bewuchs der Landstriche. Darüber hinaus erfasst Effis alle Brände, die eine Fläche von mehr als 50 Hektar haben. Hoch aufgelöste Satellitenaufnahmen dafür erhält es vom Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt DLR in Oberpfaffenhofen.

Die täglichen Waldbrandwarnungen bilden die Grundlage für die nationalen Katastrophenschutz- und Forstämter der Mitgliedsstaaten. In Deutschland arbeitet der Deutsche Wetterdienst in Offenbach eng mit Effis und der EU-Forschungsstelle zusammen. Die Anstalt öffentlichen Rechts generiert für das gesamte Bundesgebiet einen nationalen Waldbrandgefahrenindex. Dieser wurde vor gut drei Jahrzehnten in den jetzigen ostdeutschen Bundesländern entwickelt und nach einer Anpassung an internationale Konventionen auf das gesamte Bundesgebiet übertragen. Die ebenfalls fünf Gefahrenstufen errechnet der Deutsche Wetterdienst aus den Mittagswerten der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit sowie der Niederschläge (oder im Frühjahr der Schneehöhe) der vergangenen 24 Stunden. Ferner geht der Vegetationsstand in die Kalkulation mit ein. Zwar gilt Deutschland im Gegensatz zu den Vereinigten Staaten oder den Mittelmeeranrainern nicht gerade als typisches Waldbrandland. Doch lässt die globale Klimaveränderung eine zunehmende Gefährdung in den kontinentalen Lagen Europas erwarten – beispielsweise in Brandenburg, Polen und Weißrussland.

DPA / ANA. NIKITAS KOTSIARIS

Schier unlöschbar loderten die Wäldbrände Ende August 2007 auf dem Peloponnes, hier bei der Hafenstadt Andritsaina.

Schon heute ist Brandenburg das am stärksten von Waldbränden gefährdete Bundesland Deutschlands. Deshalb wurde hier sowie in weiteren ostdeutschen Bundesländern ein automatisches Fernbeobachtungssystem mit dem Namen FireWatch errichtet. Das auf Videokameras basierende System der Firma IQ wireless besteht aus 130 Beobachtungstürmen, die Tag und Nacht jeweils bis zu 700 Quadratkilometer Wald überwachen.

In Brandenburg hat vor einigen Jahren auch die Forschungsgruppe Feuerökologie und Biomasseverbrennung des Max-Planck-Instituts für Chemie in Freiburg versucht, amerikanische Simulationsprogramme an die deutschen Verhältnisse anzupassen. Trotz erfolgreicher Experimente haben sich diese Systeme aber bislang nicht durchgesetzt. Ein Hemmnis ist beispielsweise die Notwendigkeit, möglichst alle brennbaren Stoffe im Wald – einschließlich Blätter, Nadeln, Reisig oder bereits geschlagenem Holz – möglichst genau zu kartografieren, damit Computermodelle einigermaßen zuverlässige Vorhersagen hervorbringen.

Wegen des gewaltigen Aufwands ist dies bislang nicht geschehen, meint Waldbrandexperte Johann Georg Goldammer vom Freiburger Max-Planck-Institut. »In Deutschland blieben alle Anstrengungen dieser Art in den Kinderschuhen stecken«, sagt der Feuerökologe etwas entmutigt. Eventuell werden künftige Hitzewellen und Trockenheiten die Notwendigkeit dazu deutlicher zum Vorschein bringen.

Gerhard Samulat

PETER ARNOLD INC., MARK EDWARDS

SPOTFIRE IMAGES, MIKE MCMILLAN

Bodenfeuer (links) können rasch in Wipfelfeuer (rechts) übergehen, doch werden verbesserte Computermodelle benötigt, um solche Wechsel vorherzusagen.

mehreren Ebenen. Aber wenn Politiker Maßnahmen durchsetzen sollen, um die Zahl starker Waldbrände zu vermindern, die Kosten für die Feuerbekämpfung zu senken und auch die natürliche Rolle des Feuers in Ökosystemen wiederherzustellen, dann müssen die Fachleute zuerst die Langzeitwirkungen verschiedener forstlicher Strategien vorlegen. Solche Maßnahmen bestehen unter anderem darin, nicht einfach stets alle Feuer zu ersticken, sondern auch kontrolliert Brände zu entfachen und die Wälder manuell auszudünnen.

Beim Simulator der Waldvegetation handelt es sich um ein Softwareprogramm, das berechnet, wie sich solche Maßnahmen langfristig auswirken können. Es simuliert das Wachstum von Bäumen, ihr Absterben und die Regeneration des Bestands. Wenn das Programm außerdem Daten über Feuer und brennbares Material verarbeitet, können die Experten beurteilen, wie das Ausdünnen des Baumbestands oder das gezielte Legen eines begrenzten Waldbrands die Stärke eines künftigen Feuers verändern würde. Ein spezielles Visualisierungssystem kann damit die Resultate bildhaft darstellen. Beispielsweise lässt sich mit der Software untersuchen, welche Auswirkungen ein Waldbrand im Jahr 2065 auf einen Baumbestand hätte, wenn in diesem entweder ab 2007 keine Eingriffe mehr vorgenommen würden oder wenn dort gezielt ein Brand gelegt worden wäre.

Ebenso ist die zu erwartende Anhäufung von brennbarem Material zu berücksichtigen. Das so genannte FlamMap-Modell berechnet, wie ein Feuer in einer Landschaft um sich greifen würde, vorausgesetzt, das vorhandene Brennmaterial bliebe unverändert, aber das Klima änderte sich. Forstplaner haben FlamMap für die kalifornische Sierra Nevada benutzt, um die Regionen zu bestimmen, die von Ausdünnung und gezielter Brandlegung profitieren würden. Auch mit dem von einem von uns (Andrews) und anderen entwickelten BehavePlus-Modell lässt sich einschätzen, ob ein gezielt gelegtes Feuer für ein Gebiet von Vorteil sein könnte, das mit Hilfe von FlamMap untersucht wurde.

BehavePlus ermittelt die Randwerte, unter denen solch ein künstlich gelegter Brand auf ein bestimmtes Gebiet beschränkt bliebe, jeweils für verschiedene Windstärken, Windrichtungen und Feuchtigkeitswerte. Wenn das potenziell brennbare Material relativ feucht ist, wäre eine höhere Windgeschwindigkeit hinnehmbar als für trockenes Brennmaterial. Um auch unvorhergesehene Zwischenfälle einzubeziehen, zeigen solche Simulationen, über welche Entfernungen von der Brandstelle heiße Funken treiben können und wie hoch die Gefahr ist, dass sie weitere Brandherde außerhalb des geplanten Bereichs entfachen.

Landschaftsgestalter entscheiden sich weit häufiger, als viele glauben, dafür, lokale Feuer zu legen. Nach Angaben des NICC wurden 2006 in den USA mit Hilfe von über 24 000 künstlichen Bränden rund 1,1 Millionen Hektar Land abgefackelt. Die Computermodelle für solche Aktionen werden laufend optimiert, um etwa die Hitze eines Feuers oder die Rauchentwicklung besser einzuschätzen. Denn zu viel Rauch kann beispielsweise Straßensperrungen nötig machen oder nahe gelegene Siedlungen beeinträchtigen.

Modelle mit Fluiddynamik

Ingenieure, Programmierer und Forstwissenschaftler arbeiten daran, ihre Vorhersagemodelle zu verbessern. Wir haben hier nur einige Fälle vorgestellt. Zusammen sollen sie den Brandschützern bestmögliche Prognosen an die Hand geben.

Dazu wird es nötig sein, die zu Grunde liegenden Modelle zu verfeinern, etwa jene zur Berechnung der Flammenhöhe oder der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Feuerfronten. Ein Waldbrand ist eine mobile Verbrennungsreaktion mit unbegrenztem Zugang zu Sauerstoff und Brennmaterial. Letzteres tritt in beliebig vielen Kombinationen von Partikelgrößen, Dichte, Feuchtigkeit und räumlicher Verteilung auf – und das bei variablem Wetter. Das verlangt Vereinfachungen bei den Annahmen. Für dieses Problem blicken die Forscher zu anderen Disziplinen. Viel versprechend erscheint die numerische Fluiddynamik. Sie eignet sich gut zur Brandmodellierung, da sie Verbrennungskinetik, Chemie und Wärmetransfer simulieren kann.

Jedenfalls hat es nach einer zähen Entwicklung in den letzten Jahren inzwischen einen deutlichen Fortschritt bei den Modellprognosen für Waldbrände gegeben. Es geht darum, Brände wirkungsvoll zu begrenzen, während man zugleich der Natur so weit wie möglich ihren Lauf lässt. ◁

Die Physikerin **Patricia Andrews** und der Forstwissenschaftler **Mark Finney** (oben) entwickelten einige der Computermodelle, die überall in den USA zur Vorhersage von Waldbränden Verwendung finden. Beide arbeiten am Fire Sciences Laboratory in Missoula (US-Bundesstaat Montana), das von der Forstverwaltung der USA betrieben wird. **Mark Fischetti** ist Redakteur bei Scientific American.

www.nifc.gov/fire_info.html

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/905473.

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

Was ist wirklich rational?

Wenn man es sich richtig überlegt, ist es die Unberechenbarkeit. Das ergibt sich aus der lebhaften Diskussion, die unser Artikel über das Urlauberdilemma (August 2007, S. 82) ausgelöst hat.

Von Christoph Pöppe

»Das Problem ist nicht die Rationalität, sondern deren algorithmische Abbildung im Rahmen der Spieltheorie«

Wenn eine fremde Autorität mir ansagt, was vernünftigerweise für mich das Beste ist, ich folge diesem Rat, und am Ende kommt die schlechteste aller Möglichkeiten für mich heraus: Dann ist es an der Zeit, diese Autorität auf den Müll zu werfen. Und wenn eine seriöse Wissenschaftszeitschrift dieser Autorität ihre Seiten öffnet: Dann ist es an der Zeit, diese Zeitschrift – na ja, zumindest sehr nachdrücklich zur Ordnung zu rufen. Und das haben Sie, verehrte Leser, massenhaft getan.

Der Artikel »Das Urlauberdilemma« aus dem Augustheft beschreibt eine Handlung als unausweichliche Konsequenz einer rationalen Grundhaltung, die so eklatant unvernünftig ist, dass man am Verstand des Autors zweifeln möchte. Aber daran mangelt es nicht – im Gegenteil: Kaushik Basu hat diese merkwürdige Geschichte mit den beiden Urlaubern und ihren beiden gleichen Vasen, die auf dem Heimflug zu Bruch gegangen sind, mit Bedacht so konstruiert, dass der genannte Widerspruch krass zu Tage tritt.

Räumen wir zunächst ein paar Missverständnisse beiseite. Entgegen einer häufig geäußerten Annahme spielen unsere fiktiven Urlauber Tanja und Markus nicht gegeneinander. Alles, was sie wollen, ist ihren eigenen Nutzen zu maximieren. Nehmen wir an, Tanja sagt 99 und Markus 100; dann stört es Markus nicht, dass Tanja mehr bekommt als er, nämlich 101 gegen 97. Aber wenn er wüsste, dass Tanja 99 sagt, würde er selbstverständlich auf 98 gehen, denn das würde ihm 100 Euro einbringen. Es sind diese 3 Euro mehr für ihn selbst, die ihn zu diesem Wechsel motivieren; dass Tanja dadurch auf 96 fallen würde, erregt bei ihm weder Bedauern noch Schadenfreude.

Beide Spieler sind also habgierig, aber weder missgünstig noch altruistisch. Das ist eine von mehreren Eigenschaften, welche die Spieltheorie unter dem Begriff »rational« zusammenfasst. Unter mehreren zur Verfügung stehenden Alternativen wählt ein rationaler Spieler stets diejenige, die ihm am meisten einbringt. Dabei ist er bereit, unbegrenzt lange und intensiv über die Strategie nachzudenken, die seine Habgier am besten befriedigt. Insofern ist er sehr berechenbar.

Die Online-Debatte

Hier finden Sie eine Auswahl aus den zahlreichen Leserbriefen zu dem Artikel »Das Urlauberdilemma« von Kaushik Basu. Die ungekürzten Fassungen und weitere Kommentare finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/893108.

Dr. Gunter Berauer, München:
Im Fall des Urlauberdilemmas wird sicher kein Mensch auf die Idee kommen, eine Preisangabe für die Vasen zu machen, die vorhersehbar dazu führt, dass er den kleinsten möglichen Schadensersatzbetrag bekommt. Im Gegenteil, es werden immer beide einen hohen Betrag angeben, weil sie auch nur so einen hohen Betrag von der Versicherung bekommen können. Das ist so simpel, dass man es sich kaum getraut hinzuschreiben, und ich kann beim besten Willen nicht erkennen, was an diesem Verhalten irrational sein soll.

Wenn die Spieltheorie zu dem Ergebnis führt, es sei rational, das Vernünftigste und das Logischste, das Gegenteil zu tun und den kleinsten Betrag anzugeben, dann ist die Spieltheorie hier nicht anwendbar, oder sie ist selbst in höchstem Grade irrational und unlogisch. Ich würde es noch schärfer formulieren und eine solche Theorie sogar als unsinnig bezeichnen.

Berthold Hövel, Overath:
Das Problem ist hier nicht der Begriff der Rationalität, sondern der Algorithmus, der diese Rationalität abbilden soll. Hier versagt die

Das klingt zwar ein bisschen gefühlskalt, aber durchaus vernünftig: rational im umgangssprachlichen Sinn des Wortes. Umso überraschender ist es, dass die beiden Rationalitäten, die gewöhnliche und die spieltheoretische, im Urlauberdilemma so himmelweit auseinanderfallen. Um nicht weiter falsche Assoziationen zu wecken, will ich im Folgenden einen Spieler, der sich rational im Sinn der Spieltheorie verhält, nicht mehr »rational«, sondern »theorietreu« nennen.

Ein theorietreuer Spieler ist so berechenbar, dass man in jeder Situation genau weiß, was er tun wird. Das weiß auch sein Partner, der in jeder Hinsicht sein genaues Ebenbild ist. Also überlegt sich Markus, was Tanja sagen wird. Zunächst scheint 100 für sie die günstigste Wahl. Unter diesen Umständen ist es für ihn optimal 99 zu sagen. Aber das denkt sich Tanja auch; also geht sie davon aus, dass Markus 99 sagen wird, wählt daraufhin 98, das denkt sich Markus und sagt 97 – und schon befinden sich beide in einer Abwärtsspirale, die kein Halten mehr kennt, bis beide bei der schlechtesten aller Möglichkeiten angelangt sind: zwei Euro für jeden.

Es ist also Dynamik im Spiel, aber nicht in dem eigentlichen Spielzug, sondern vorher, in den Köpfen der Beteiligten. Das Spielfeld, auf dem diese abstrakte Bewegung stattfindet, ist die so genannte Auszahlungsmatrix, eine Tabelle, in der übersichtlich verzeichnet ist, wie viel Geld jede Kombination von Spielzügen den beiden Spielern einbringt (Kasten rechts). Man darf sich das so vorstellen, dass Tanja einen breiten, niedrigen Sehschlitz, der gerade eine Zeile dem Blick freigibt, nach oben oder unten über die Matrix schiebt; Markus schiebt entsprechend einen schmalen Sehschlitz, der eine Spalte freigibt, nach links oder rechts.

Das Urlauberdilemma

Zwei Spieler – nennen wir sie Tanja und Markus oder abstrakt *A* und *B* – sagen, unabhängig voneinander und ohne sich verständigen zu können, eine ganze Zahl zwischen 0 und einem Maximum x_{max} an. Nennen beide die gleiche Zahl *x*, so bekommen beide *x* Euro ausgezahlt. Andernfalls bekommt derjenige, der die niedrigere Zahl – nennen wir sie wieder *x* – angesagt hat, $x + b$ Euro und der andere nur $x - b$ Euro. In dem im Artikel ausgeführten Beispiel ist $x_{max} = 100$ und der »Bonus« $b = 2$.

Es ist also einerseits vorteilhaft, eine möglichst hohe Zahl anzusagen; andererseits ist es auch vorteilhaft, eine niedrigere Zahl zu nennen als der Spielpartner. Diese widerstreitenden Ziele machen das Urlauberdilemma aus.

Die zugehörige Geschichte – die beiden Spieler sind Urlauber, denen auf dem Heimflug zwei identische Vasen zu Bruch gegangen sind, und der Schadenssachbearbeiter der Fluggesellschaft konfrontiert die beiden mit diesem Spiel, um die Schadenszahlung zu minimieren – ist hilfreich für das Vorstellungsvermögen, aber für die spieltheoretische Analyse des Dilemmas entbehrlich.

Markus' Wahl (in Euro)

Tanjas Wahl (in Euro)	2	3	4	…	98	99	100
2	2 2	4 0	4 0	…	4 0	4 0	4 0
3	0 4	3 3	5 1	…	5 1	5 1	5 1
4	0 4	1 5	4 4	…	6 2	6 2	6 2
…	…	…	…		…	…	…
98	0 4	1 5	2 6	…	98 98	100 96	100 96
99	0 4	1 5	2 6	…	96 100	99 99	101 97
100	0 4	1 5	2 6	…	96 100	97 101	100 100

MATT COLLINS

Die Auszahlungsmatrix des Urlauberdilemmas: Tanja darf aus dieser Tabelle eine Zeile wählen, Markus eine Spalte. Das Feld im Schnittpunkt von gewählter Zeile und gewählter Spalte bestimmt die Auszahlungen (rot für Tanja, blau für Markus).

Spieltheorie vollständig. Das wollte der Autor mit seinem Artikel ja auch aufzeigen. Er zieht hier nur völlig falsche Schlüsse, weil er den Begriff der Rationalität selbst als gefährdet ansieht und nicht nur dessen algorithmische Abbildung. Für einen Wissenschaftler ist die Unfähigkeit, zwischen beiden zu unterscheiden, ein wirklich blamabler Fehler.

Die Suche nach dem Nash-Gleichgewicht als Lösungsstrategie ist offensichtlich (und wahrscheinlich auch grundsätzlich) ein falscher Ansatz und muss durch eine andere Ermittlung der Gewinnmaximierung ersetzt werden. Das ist alles.

Sämtliche Folgerungen, die der Autor aus dieser vermeintlichen Krise zieht, haben also keine Grundlage und sind daher wertlos. Viel bleibt dann jedoch nicht mehr vom Artikel übrig.

Sabine Schulz, Hoyerswerda:

In wissenschaftlichen Fachtexten findet man meistens statt Euro oder Dollar nur abstrakte Geldeinheiten. Es ist also nicht definiert, wie viel eine Geldeinheit wert ist. Wäre der Gegenstand der Verhandlungen eine äußerst wertvolle Ming-Vase, würde man alle Beträge (Geldeinheiten) mit 1000 multiplizieren müssen, um vernünftige Euro-Beträge zu erhalten. 2000 Euro Strafe tun dann schon weh.

Fritz Kronberg:

Das Urlauberdilemma mag als Gedankenspielerei ganz lustig sein, ist aber in den Schlussfolgerungen ziemlich blödsinnig. Es wird nämlich völlig die Tatsache vernachlässigt, dass jeder von einer Versicherung zumindest seinen Verlust ersetzt haben möchte.

Nimmt man den Fall, die Vase habe auf dem Trödelmarkt wirklich 5 Euro gekostet, so ist die Auswahl 2 Euro ein sicherer Verlust von 3 Euro für beide oder von einem Euro für einen und 5 Euro für den anderen. Eine solche Entscheidung wäre höchst irrational. Die einzige Möglichkeit, mit einiger Sicherheit wenigstens einen Euro Gewinn zu machen, ist hier die Auswahl 4 Euro. Geht man darüber hinaus von einer gewissen Gier des anderen aus, ist die Auswahl 5 >>

sprechend einen hohen, schmalen Sehschlitz nach rechts oder links. Was am Ende bei dem Spiel herauskommt, steht in dem einzigen Feld, das beide Schablonen sichtbar lassen.

Wenn Tanja nun probeweise ihre Schablone auf 100 stellt, bemerkt sie, dass unter allen Umständen die Wahl 99 besser wäre: Ihre Auszahlung steigt von 100 auf 101, wenn Markus 100 gewählt hat, von 97 auf 99, wenn seine Wahl 99 war, und bleibt in allen anderen Fällen unverändert. Also kann sie ihre Zeile 100 aus der Matrix streichen.

Nur denkt Markus genauso; also ist auch seine Spalte 100 zu streichen, und die Matrix hat dieselbe Struktur wie zuvor, nur eine Zeile und eine Spalte kürzer. Folglich kann man dieselben Überlegungen wie zuvor anwenden, und durch Induktion – den Schluss von einem Matrixzustand auf den nächstkleineren, und so weiter – schmilzt die Matrix auf den kümmerlichen Rest zusammen, der nur noch aus dem Feld (2, 2) besteht.

Bereits nach wenigen Induktionsschritten hat die Matrix kein Feld mehr, in dem eine Auszahlung von 100 oder mehr steht. Beide könnten nach wie vor mit je 100 Euro aus dem Spiel gehen; die ganze Dynamik hat ja nur in ihren Gedanken stattgefunden. Aber sie haben sich diese Möglichkeit buchstäblich aus dem Kopf geschlagen.

Das ist die Stelle, an der die verschiedenen Arten von Rationalität sich trennen. Ein theorietreuer Spieler denkt an dieser Stelle nicht weiter; ein vernünftiger Mensch stellt die ganze logische Schlusskette in Frage und sucht nach deren schwächstem Glied.

Einen möglichen Angriffspunkt hat – neben vielen anderen Lesern – Wolfgang Zesch aus Zürich formuliert (siehe seinen Leserbrief »Weit vom Nash-Gleichgewicht« im Oktoberheft, S. 8): Nach Voraussetzung weiß *A* nicht nur, dass *B* »rational« ist (in welchem Sinn auch immer); er weiß auch, dass *B* weiß, dass *A* selbst rational ist, *B* weiß, dass *A* das weiß,

Das Gefangenendilemma

Die übliche Geschichte zu diesem Dilemma handelt von zwei verhafteten Verdächtigen, die jeder einzeln, ohne sich mit dem anderen verständigen zu können, vor die Wahl gestellt werden, entweder miteinander zu kooperieren, das heißt zu dem gemeinsam begangenen Verbrechen zu schweigen, oder nicht zu kooperieren, das heißt auszusagen und sich dafür Strafmilderung einzuhandeln.

Auf seinen abstrakten Kern reduziert läuft das Gefangenendilemma auf die links unten abgebildete Matrix hinaus. Nicht kooperieren ist in jedem Fall vorteilhafter, einerlei, was der andere tut. Also werden beide nicht kooperieren, wodurch ihnen der durch Kooperation zu erzielende Gewinn entgeht.

Viele Arbeiten haben sich mit der Frage beschäftigt, wie es in der Situation des Gefangenendilemmas entgegen der pessimistischen Prognose der Spieltheorie doch noch zu Kooperation kommen kann. Dazu müsste zwischen den Parteien Vertrauen oder dessen abstraktes Äquivalent aufgebaut werden. Das kann insbesondere gelingen, wenn zwei Spieler das Spiel immer wieder miteinander spielen (»iteriertes Gefangenendilemma«).

	N	K
N	2 2	4 0
K	0 4	3 3

MATT COLLINS

	N	K
N	*b b*	*d a*
K	*a d*	*c c*

Eine mögliche Auszahlungsmatrix des Gefangenendilemmas (links). K steht für »kooperieren«, N für »nicht kooperieren«. Auf die genauen Zahlenwerte kommt es nicht an. Jede Auszahlungsmatrix der rechts angegebenen Art beschreibt ein Gefangenendilemma, wenn nur $a < b < c < d$ gilt.

>> Euro optimal. Das sichert einen bescheidenen Gewinn von 2 Euro und bestraft den Gierigen mit einem ebenso großen Verlust. Auf diese Weise bekommt der Versicherungsvertreter ehrliche Angaben, ist also doch nicht so dumm.

Maik Sonnenberg, Düsseldorf:
Mein erster Gedanke war: »Was interessieren mich die lausigen zwei Euro? Es ist reine Zeit- und Energieverschwendung und somit völlig unwirtschaftlich (= irrational), mir darüber den Kopf zu zerbrechen.«

These: Die Spieltheorie führt doch zum Ziel. Es ist alles eine Frage der Wertmaßstäbe.

Betrachten wir zunächst einmal das Problem ohne die Bedingung der Strafzahlung: Dann wählt jeder Spieler den maximalen Betrag von 100, da sich durch Reduzierung die Auszahlung unter keinen Umständen verbessern lässt.

Wenn die Strafgebühr gering ist, lasse ich sie außer Acht, und die optimale Strategie bleibt der maximale Auszahlungsbetrag 100. Wenn sie hoch ist, zum Beispiel 50, und der Verlust mir weh täte, kann sie nicht mehr vernachlässigt werden, und die optimale Strategie ist der minimale Auszahlungsbetrag 50.

Diese beiden Strategien in Abhängigkeit von der Höhe der Strafzahlung treten deutlich in den angeführten Studien hervor.

Christian Thalmann, Zürich:
Unter der offenbar üblichen spieltheoretischen Grundannahme »der andere denkt gleich« treten beide Spieler einander mit der identischen Strategie gegenüber, folglich ist der Erwartungswert des Gewinns für beide Spieler gleich hoch.

Es gibt so nur zwei mögliche Strategien:
– Gleichstand. Beide Spieler setzen immer die gleiche Zahl und erhalten folglich diese ausbezahlt. Hier ist der maximale Einsatz (100) zwangsläufig der optimale Einsatz.
– Gewinnen/Verlieren. Die Spieler wählen ihren Einsatz zufällig (zum Beispiel 99 oder 100, je mit 50 Prozent Wahrscheinlichkeit). Sie »gewinnen« also einen Teil aller Spiele, »verlieren« einen gleich

und so weiter ad infinitum. Außerdem sind beide Spieler völlig berechenbar in ihrem Verhalten; für individuelle Abweichungen ist in der Modellvorstellung kein Raum. Nachdem also beide Spieler identische Exemplare eines ziemlich fantasielosen Kunstwesens sind – und das wissen –, ist die Vorstellung, sie könnten zu irgendeinem Zeitpunkt verschieden handeln, abwegig. Beide können von Anfang an unterstellen, dass sie die gleiche Wahl treffen werden, und müssen nur noch darüber nachdenken, welche. Aus der ganzen großen Auszahlungsmatrix stehen damit nur noch die Felder der Hauptdiagonale (von links oben nach rechts unten) zur Debatte.

Unter ihnen ist (100, 100) das eindeutige und leicht zu findende Optimum. Beide wählen 100 und sind glücklich und zufrieden. Warum kommen sie zu diesem Glück? Weil sie sich die Möglichkeit, durch abweichendes Verhalten (99) einen Euro dazuzuverdienen, aus dem Kopf geschlagen haben: Es gibt kein abweichendes Verhalten.

Wohlgemerkt: Um zu diesem Schluss zu kommen, muss keiner der Spieler sich seinem Partner irgendwie verbunden fühlen. Es genügen die beiden Lebensprinzipien »Ich bin habgierig« und »Der andere ist genau wie ich«.

Leider haben die Spieltheoretiker einen sehr handfesten Grund dafür, dieser Argumentation nicht zu folgen: die Realität. Es kommt praktisch nicht vor, dass ein echter Mensch einen anderen echten Menschen für genauso rational hält wie sich selbst. Kein Geringerer als Douglas Hofstadter (»Gödel, Escher, Bach«) hat das Problem in dieser Zeitschrift in aller Ausführlichkeit durchdiskutiert (September 1983, S. 8).

Hofstadter schrieb an zwanzig seiner Freunde gleich lautende Briefe, in denen er sie einlud, eine Runde Gefangenendilemma gegen jeden der 19 anderen zu spielen. Die Auserwählten waren nicht nur – in Hofstadters und ihrer eigenen Einschätzung – rationale Denker; dem Text des Briefs konnten sie entnehmen, dass auch die Mitspieler ihre Entscheidung nur von dem Ergebnis sorgfältigen, emotionslosen Nachdenkens und von nichts anderem abhängig machen würden. Alle Beteiligten konnten davon ausgehen, dass die Voraussetzungen für jeden von ihnen dieselben waren und jeder den klaren Regeln des rationalen Schließens folgen würde. Also müssten sie auch alle zum selben Ergebnis kommen, und unter dieser Voraussetzung …

Es kam das heraus, was in solchen Fällen regelmäßig herauskommt: Ein aufrechtes Häuflein von sechs Kooperierern wurde von vierzehn Verweigerern dominiert. Zumindest in dieser Hinsicht gibt also die Spieltheorie die Wirklichkeit besser wieder als die – logisch unanfechtbare – Theorie von der Gleichheit aller Spieler.

Mehrere Leser haben das offensichtliche Versagen der Spieltheorie im Urlauberdilemma zum Anlass genommen, die ganze Theorie auf den Müll zu werfen. Das halte ich für weit übertrieben. Erstens gibt es viele Bereiche, in denen die Theorie das menschliche Verhalten hervorragend beschreibt – die klassische Wirtschaftswissenschaft lebt vom rationalen Nutzenmaximierer, und das nicht schlecht –; und wo sie das nicht tut, wie in der Modellierung der menschlichen Risikobereitschaft (Spektrum der Wissenschaft 12/2002, S. 22), ist sie möglicherweise gerade deswegen nützlich.

Es kann schon sein, dass A genauso denkt wie B. Aber es kommt nur sehr selten vor, dass einer von ihnen darauf vertraut. Das ist die Tücke des Gefangenendilemmas

großen Teil und erzielen in den verbleibenden Spielen Gleichstand (im konkreten Beispiel 25 / 25 / 50 Prozent). Weil die Auszahlung bei Ungleichstand auf dem tieferen der beiden Einsätze basiert, liegt der langfristige Ertrag unter dem Mittel der Einsätze (99,25 in diesem Beispiel).

Ganz offensichtlich ist die erste der beiden Strategien gewinnbringender und 100 somit die rationalste Strategie.

Die im Artikel als rational verkaufte Überlegung, dass die Strategie 99 über 100 »dominiere«, ist unter dem Axiom, dass der andere Spieler immer gleich denkt, falsch. Sie geht fälschlicherweise davon aus, dass das Gegenüber immer noch 100 setzt, während man selbst einen Schritt weiter gedacht hat. Die Strategie 99 bringt bei gleich denkenden Spielern einen erwarteten Gewinn von 99 statt 100 und ist somit unterlegen.

Matthias Rupp, Karlsruhe:

Mein Mitspieler denkt genau wie ich. Wenn ich eine hohe Zahl nenne, wird er das auch tun! Da aber keiner genau weiß, was der andere antworten wird, müssen beide Vermutungen darüber anstellen, welche Zahl der andere wahrscheinlich nennen wird.

Wenn beide nach dem Grundsatz der Spieltheorie handeln und das gleiche tun, folgt daraus ein Algorithmus, den ich hiermit zur Ermittlung der optimalen Strategie vorschlage:

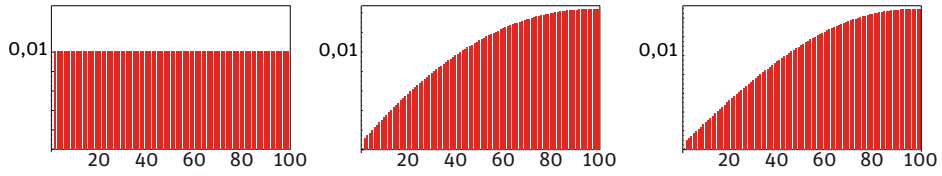
1. Nimm für jede Zahl x eine (beliebige) Wahrscheinlichkeit $p(x)$ an, mit der der Mitspieler diese Zahl wählen wird. Die Gesamtwahrscheinlichkeit für alle x soll 1 sein.
2. Ermittle mit dieser Verteilung für jede Zahl y die mittlere Auszahlung $a(y)$. (Das ist die Auszahlung, die man im Mittel in sehr vielen Spielen bekommen wird, wenn man immer die Zahl y nennt und sich der Partner an die angenommene Verteilung hält.) Sie berechnet sich wie folgt:

$$a(y) = p(y)y + \sum_{x>y} p(x)(y+2) + \sum_{x<y} p(x)(x-2),$$

wobei $\sum_{x>y}$ bedeutet: Summe von $x = y+1$ bis 100 (allgemein x_{max}). Entsprechend läuft $\sum_{x<y}$ von 2 (allgemein x_{min}) bis $y-1$.

>>

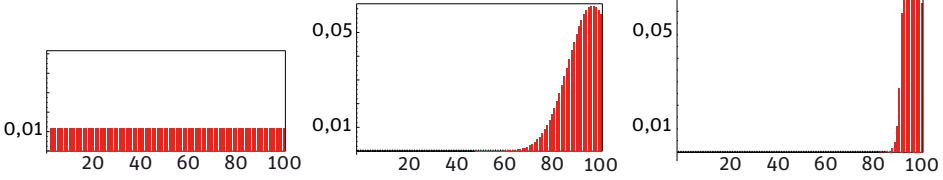
Gemischte Strategien



Die Spieler im Urlauberdilemma könnten ihre Ansagen vom Zufall abhängig machen: Jeder Spieler wählt – indem er zum Beispiel ein Zufallsexperiment macht oder ein Computerprogramm mit demselben Effekt laufen lässt – die Ansage x mit der Wahrscheinlichkeit $p(x)$. An Stelle der Auszahlungen ist dann mit deren Erwartungswerten zu rechnen.

Unter der Voraussetzung, dass Spieler B jede mögliche Ansage mit der gleichen Wahrscheinlichkeit wählt (Bild oben, links), ergeben die erwarteten Auszahlungen für A eine (ziemlich flache) Parabel (Mitte). Nehmen wir nun an, A wählt seine Ansage nach der – noch unbekannten – Wahrscheinlichkeitsverteilung p; und zwar ist $p(x)$ proportional der erwarteten Auszahlung für die Ansage x unter der Annahme, dass B seiner Ansage ebenfalls die Verteilung p zu Grunde legt. Das ergibt ein Gleichungssystem für die Wahrscheinlichkeitsverteilung p, das sich iterativ lösen lässt. Die Lösung (Bild oben, rechts) weicht geringfügig von der Parabelform ab.

Bevorzugen die Spieler die günstigen Möglichkeiten stärker als nur proportional der Auszahlung a, zum Beispiel proportional zu $f(a) = e^a$, so verschlankt sich die Kurve, und die Wahrscheinlichkeiten konzentrieren sich in der Nähe des Maximums bei 95. Die Grafiken unten zeigen die sich so ergebende Wahrscheinlichkeitsverteilung p unter der Voraussetzung, dass B die Gleichverteilung (Mitte) oder ebenfalls die Verteilung p wählt (rechts).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Nein – es muss darum gehen, diesen vertrackten Rationalitätsbegriff nachzubessern. Und dazu haben einige Leser einen überraschenden, neuen Ansatz geliefert.

Mit der Berechenbarkeit unserer Mitmenschen – auch der rationalen unter ihnen – ist es offenbar nicht weit her. Das geht aus den in Basus Artikel zitierten Experimenten ebenso hervor wie aus Hofstadters Massenbrief und jedermanns Erfahrung. Also ist die in der Theorie enthaltene Unterstellung, A wisse genau, wofür sich B in einer gegebenen Situation entscheiden werde, unrealistisch. Vielmehr muss A ins Kalkül ziehen, dass seine Kenntnis über Bs Verhalten mit Unsicherheit behaftet ist. Wie macht man das?

Dafür stellt die Wahrscheinlichkeitstheorie ein Standardverfahren bereit. A unterstellt, dass B eine gemischte Strategie verfolgt, das heißt seine Antwort nach dem Zufallsprinzip gibt: Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit wird B 100 sagen, mit einer möglicherweise anderen Wahrscheinlichkeit 99 und so weiter bis hinunter zum Wert 2. Denn vom Standpunkt des Nichtwissenden aus sind Nichtwissen und Zufall so ziemlich dasselbe.

Mangels sicheren Wissens kann A nicht mehr seine Auszahlung maximieren, sondern nur noch den Erwartungswert der Auszahlung (das, was Matthias Rupp in seinem Leserbrief die »mittlere Auszahlung« nennt). Man multipliziere die Auszahlung für A in dem Fall, dass B die Zahl x ansagt, mit der Wahrscheinlichkeit $p(x)$ dafür, dass B das tut, und summiere über alle x von 2 bis 100: Das ist der Erwartungswert der Auszahlung für A. Der hängt allerdings noch von der Zahl y ab, die A selbst ansagt. Also berechne man den genannten Er-

>> 3. Erzeuge eine neue Verteilung: $p(x) = a(x)/\text{Summe}(a)$
4. Wiederhole 2. und 3., bis Konvergenz erreicht ist.

Ich habe diesen Algorithmus in einem einfachen Programm implementiert. Er scheint für alle Startverteilungen zu konvergieren.

Das Maximum der Auszahlung und der Wahrscheinlichkeitsverteilung liegt bei $x = 96$ und $x = 97$. Es sei denn, man gibt als Startwert $p(2) = 1$ vor, dann beobachtet man keine Änderung der Wahrscheinlichkeitsverteilung.

Dieser Algorithmus gibt auch die beobachteten Ergebnisse qualitativ wieder: Ist der Bonus/Malus groß, so liegt das Maximum bei der kleinstmöglichen Zahl.

Wesentlich interessanter ist aber folgende Feststellung: Es gibt nicht »die« optimale Zahl (für jede Zahl gibt es eine bessere). Aber es gibt für jede Zahl eine optimale Wahrscheinlichkeit, diese zu wählen, sodass man (und der Mitspieler, der durch die gleiche Überlegung auf dieselbe Verteilung kommt) den Gewinn insgesamt optimiert.

Mario Semo, Wien:
Ich würde jene Zahl als beste bewerten, die die maximale erwartete Auszahlung bringt. Und das genau ist es meiner Meinung nach, was Menschen machen. Sie versuchen, den Erwartungswert zu maximieren. Nur: Sie können es niemals »wirklich«.

In meinem Sinn wäre die Strategie der Wahl beim ursprünglichen Urlauberdilemma mit den Parametern (2, 100, 2) gleich 96 und bei dem Problem mit (180, 300, 5) gleich 290.

Ein Beispiel: Ich wähle 100. Der Partner kann die Werte 2, 3, 4, ..., 99, 100 wählen, was für mich die Auszahlungen 0, 1, 2, ..., 97, 100 ergibt. Wenn ich jeder Wahl des Partners die gleiche Wahrscheinlichkeit zuweise (die dann 1/99 ist), ergibt sich für meine Auszahlung der Erwartungswert $(1/99)(0+1+2+\ldots+97+100) = 49{,}0202$. Nun maximiere ich das über alle möglichen Wahlen meines eigenes Werts und bekomme: Die beste Wahl ist 96 mit der erwarteten Auszahlung 49,0808.

Interessant ist das Ergebnis beim Dilemma mit den Parametern 180, 300, 5: beste Wahl 290, erwartete Auszahlung 235,413.

wartungswert für alle diese y und sage dasjenige y an, für das der Erwartungswert maximal wird.

Und wie kommt A an die Wahrscheinlichkeitsverteilung p, sprich an die Wahrscheinlichkeiten $p(x)$ für Bs Ansagen? Wenn er nichts weiß, bleibt ihm nicht viel anderes übrig, als alle Ansagen Bs für gleich wahrscheinlich zu halten. Mit dieser Annahme wird die Aufgabe, das optimale y zu finden, zu einem klassischen Maximierungsproblem. Die Kurve der Auszahlungen in Abhängigkeit von y ist eine Parabel (Kasten links), und deren höchster Punkt liegt bei $y = 96{,}5$. Da kann A sich aussuchen, ob er 96 oder 97 sagt.

Nun ist die Annahme der Gleichverteilung zwar ziemlich dämlich; aber jetzt kommt das beliebte Induktionsargument wieder zu seinem Recht. B führt dieselbe Analyse durch wie A und kommt zu dem Ergebnis, dass A wahrscheinlich etwas in der Nähe von 96 ansagen wird. Da man sich nie sicher sein kann, ringt sich B nicht zu dem Schluss durch, dass nur noch die Zahlen 96 und 97 in Frage kommen, sondern kommt – zum Beispiel – zu der Vermutung, A werde die Wahrscheinlichkeit für die Ansage y proportional der erwarteten Auszahlung für y wählen. Das entspricht einer gewissen Bevorzugung der lukrativeren Werte und ist schon erheblich plausibler als die Gleichverteilungsannahme.

Und so weiter! A vollzieht Bs Gedanken präzise nach, kommt auf Grund der nachgebesserten Wahrscheinlichkeiten zu neuen Werten für die erwarteten Auszahlungen; daraus macht B – oder A, beide denken sich sowieso dasselbe – abermals nachgebesserte Wahrscheinlichkeiten, und siehe da, das Verfahren konvergiert. Im Grenzwert haben beide dieselben Annahmen über die Wahrscheinlichkeiten des jeweils anderen und handeln danach, das heißt, sie verfolgen dieselbe gemischte Strategie. Im Erwartungswert räumen beide dabei 48,91 Euro ab.

Das ist schon deutlich besser als 2, aber noch zu zaghaft. Die Bevorzugung der »guten« Werte könnte viel ausgeprägter ausfallen. Statt die Wahrscheinlichkeit für y proportional der zugehörigen Auszahlung a zu wählen, dürfte es auch a^2 oder sogar e^a sein, oder eine Funktion, die noch stärker mit a ansteigt.

Mit der »Bevorzugungsfunktion« e^a konvergiert das Verfahren wieder gegen eine gemischte Strategie; aber diesmal ist sie weit stärker auf die hohen Werte konzentriert. Wer ihr folgt, sagt mit mehr als 99 Prozent Wahrscheinlichkeit 90 oder mehr an. Das Maximum liegt interessanterweise etwas niedriger als zuvor, nämlich bei 95, und die erwartete Auszahlung ist auf 94,17 Euro angewachsen – für jeden der beiden, wenn sie der gemischten Strategie folgen.

Auch diese Strategie ist kein Nash-Gleichgewicht. Wenn A weiß, dass B ihr folgt, kann er noch etwas mehr herausholen, indem er konstant 95 spielt – aber nicht viel: 94,57 Euro im Erwartungswert. Das sind nur noch lumpige 40 Cent für die Abweichung von der Strategie des Partners, während dieselbe Aktion bei einer reinen Strategie einen vollen Euro einbringt. Und die Bevorzugungsfunktion ist sicher noch verbesserungsfähig.

Offensichtlich zahlt es sich aus, ein bisschen unberechenbar zu sein. Und was sich auszahlt, ist rational. So haben die Spieltheoretiker das Wort definiert. ◁

Vom Standpunkt des Nichtwissenden sind Nichtwissen und Zufall so ziemlich dasselbe

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Weblinks zu diesem Thema sowie eine ausführlichere Fassung dieses Artikels finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/905475.

Ich habe ein Computerprogramm in C geschrieben, mit dessen Hilfe man die Erwartungsfunktion berechnen kann. Es kann unter http://members.hostprofis.at/semo/Spektrum/UrlauberDil.cpp heruntergeladen werden.

M. Rummey, Augsburg:
Ich bin unabhängig von Matthias Rupp auf denselben Algorithmus gekommen und habe dazu auch Simulationen erstellt …

Ich nehme eine beliebige Strategie des Gegners an und finde heraus, wie hoch mein Gewinn-Erwartungswert $a(x)$ für welche Spielvariante x ist. In der neuen Strategie nehme ich nun an, dass man eine Zugmöglichkeit umso eher verwendet, je höher der erwartete Gewinn ist: $p(x) = a(x)/\text{Summe}(a)$. Da ich annehme, dass der Gegner genauso denkt wie ich, nehme ich im nächsten Induktionsschritt an, dass diesmal der Gegner die neue Strategie verwendet.

Egal, von welcher Strategie aus man startet, man konvergiert schnell gegen eine Strategie. Die Vorgehensweise entspricht genau der Vorgehensweise von risikoneutralen Agenten.

Leider wird von der Strategie aber nicht die zu erwartende Auszahlung maximiert. Bei einer abweichenden Funktion von Gewinn zu Nutzen kommt man auf andere Strategiegleichgewichte. Also ersetzt man dann in dem von M. Rupp vorgeschlagenen Algorithmus $p(x) = a(x)/\text{Summe}(a)$ durch $p(x) = f(a(x))/\text{Summe}(f(a))$. Konkret könnte das zum Beispiel so aussehen, dass jemand von der vierfachen Geldmenge den doppelten Nutzen hat ($f(a) = \sqrt{a}$), den vierfachen ($f(a) = a$, wie oben) oder aber auch den 16-fachen Nutzen ($f(a) = a^2$).

Je nachdem, wie man diese Funktion f annimmt, kommt man auf andere Gleichgewichte, deren erwartete Auszahlung größer oder kleiner ist.

Je nachdem, wie man seinen Gegenspieler einschätzt, wie man einschätzt, dass der Gegenspieler einen selbst einschätzt … und ewig so weiter, kann man mit dieser Methode unterschiedlichste Szenarien simulieren mit unterschiedlichsten Charakteren (Gewinn-Nutzen-Funktionen) und unterschiedlichsten Informationsständen über den jeweils anderen Charakter und dessen Wissen. <<

Wiener Melange

Während in Deutschland die »Jugend forscht«, ist sie in Österreich »innovativ«. Dieses Jahr feierte der Wettbewerb »Jugend Innovativ« in Wien bereits sein 20-jähriges Jubiläum – mit Rekordbeteiligung und interessanten Ideen.

Von Sebastian Hollstein

Das große weiße Haus des Technischen Museums in Wien bietet jeden Tag vielen Schülern die Möglichkeit, anschaulich und interaktiv den Naturwissenschaften zu begegnen. Es könnte keinen besseren Ort geben für das Finale von Österreichs größtem Wissenschaftswettbewerb. Während in den unteren Etagen des mit Maschinen vollgestopften Gebäudes Erstklässler zwischen Wasserrädern und einem nachgebauten Bergwerk tobten, stellen oben im Festsaal vom 30. Mai bis zum 1. Juni 2007 15- bis 20-jährige Schüler neben naturwissenschaftlichen Projekten auch Business- oder Design-Ideen vor. Die Anforderungen der letzten beiden Kategorien stehen den wissenschaftlichen Projekten allerdings um einiges nach. Da werden Blumentöpfe gestaltet oder Werbekampagnen entworfen, was eher den Eindruck von Schulaufgaben weckt, mit denen sich Unternehmen auch noch das Geld für teure Werbeagenturen oder Unternehmensberater sparen. Für die Schüler trotzdem sicherlich eine Gelegenheit, sich auszuprobieren.

Festival der guten Laune: Beim Wettbewerb treffen sich Schüler aus ganz Österreich.

Der Wettbewerb hat sich inzwischen in der ganzen Alpenrepublik etabliert. »Insgesamt trafen 375 Projektvorschläge bei uns ein – eine beachtliche Steigerung von 30 Prozent im Vergleich zum Anfangsjahr 1987«, meint Jana Zach von der Austria Wirtschaftsservice Bank, die »Jugend innovativ« im Auftrag des Bundesministeriums für Unterricht, Kunst und Kultur ausrichtet.

Die Veranstalter halten engen Kontakt zur Wirtschaft und legen großen Wert auf die praktische Umsetzbarkeit der eingereichten Ideen. Einige Innovationen befinden sich schon während des Finales mitten im Patentierungsverfahren.

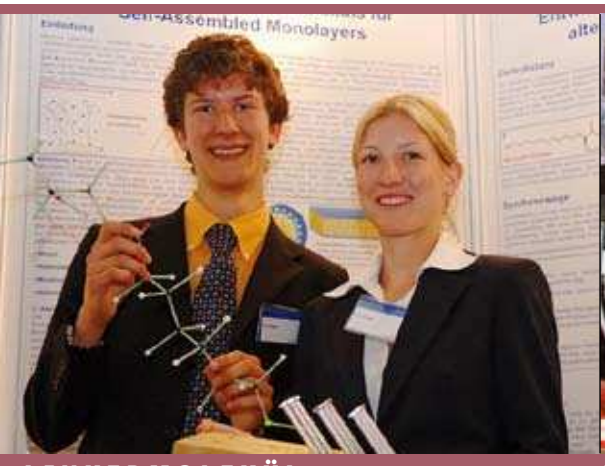
LINKERMOLEKÜL

Das gilt auch für das – nach dem einstimmigen Urteil der Jury – »beste Projekt der 20-jährigen Geschichte«. Der 19-jährige Philipp Zagar aus Wels hat sich so tief in die Nanotechnologie eingearbeitet, dass er während eines Praktikums an der Johannes-Kepler-Universität Linz zwei neue Methoden zur Herstellung von Linkermolekülen entwickeln konnte.

Die für die Nanotechnologie bedeutenden Linkermoleküle bestehen aus einem hydrophoben (Wasser abstoßenden) Mittelteil und zwei hydrophilen (wasserfreundlichen) Enden. In wässriger Lösung auf eine mit Gold bedampfte Oberfläche aufgetragen, legen sie sich von selbst mit ihren Mittelteilen aneinander, die dadurch dem Wasser ferngehalten werden, und ordnen sich schließlich zu einer selbst organisierten, nur ein Molekül dicken Schicht (*self-assembled monolayer*, SAM).

Praktische Anwendungen finden sie in der Biotechnologie und in der Technik, wo sie unter anderem verhindern, dass die Düsen von Druckerpatronen durch die Tinte verkleben.

Die neuen Verfahren Philipp Zagars haben gegenüber den bisherigen Herstellungsmethoden drei Vorteile: Sie sind effektiver, günstiger und garantieren eine höhere Reinheit des gewonnenen Produkts. Deshalb ist die wirtschaftliche Umsetzung nur eine Frage der Zeit. Der Maturant bekam den ersten Preis in der



LINKERMOLEKÜL

LATENTWÄRMESPEICHER

BIOGAS

MINIATUR-SCHALTNETZTEIL

ALLE FOTOS DES ARTIKELS: AUSTRIA WIRTSCHAFTSSERVICE

Erfinderstolz: Thomas Reiter (l.) und Daniel Katzensteiner präsentieren ihr Miniatur-Schaltnetzteil, das auch das letzte bisschen Energie aus einer Batterie herausholt.

Kategorie »Science« und wurde als Vertreter Österreichs zu Messen nach Valencia und Atlanta geschickt.

LATENTWÄRMESPEICHER

Den ersten Preis in der Kategorie »Engineering« gewann die innovative Umsetzung einer gar nicht so neuen Idee. Werner Pollhammer, David Stockinger und Julian Glechner (alle 17) aus Braunau am Inn präsentierten den Prototyp eines Latentwärmespeichers nach dem Prinzip der klassischen Handwärmekissen. Ziel der Schüler ist es dabei jedoch, ein ganzes Haus im Winter mit Wärme zu versorgen, die im Sommer gespeichert wurde – im Zeitalter steigender Energiepreise ein viel versprechendes Vorhaben.

Bestimmte Salze entziehen ihrer Umgebung viel Energie, während sie sich im Wasser auflösen. Diese könnte in Form von Solarenergie zugeführt werden, welche dann in der entstandenen Lösung gespeichert bleibt – vorausgesetzt, es setzt keine spontane Kristallisation der Salze ein, was durch die spezielle Lackierung des Speicherinnenraums verhindert werden kann. Sobald man die Wärmeenergie jedoch zum Heizen benötigt, kann eine erneute Kristallbildung samt Wärmeabgabe elektronisch oder manuell jederzeit ausgelöst werden.

Die Materialien sind nicht teuer, und der Zyklus aus Auflösen und Kristallisieren lässt sich beliebig oft wiederholen. Das macht den Latentwärmespeicher zu einer echten umweltfreundlichen Alternative zu Öl- und Gasheizungen. Firmen aus dieser Branche haben schon angefragt. Der Traum der drei Schüler, die Anlage für ein ganzes Haus zu entwickeln, könnte sich also bald erfüllen.

MINIATUR-SCHALTNETZTEIL

Jeder kennt das Problem: Kaum ist eine neue Batterie eingelegt, ist sie auch schon wieder leer. Dabei hat sie noch eine Restenergie von etwa 50 Prozent, aber für den Betrieb des Geräts reicht die Spannung nicht mehr aus. Thomas Reiter und Daniel Katzensteiner entwickelten daher ein Miniatur-Schaltnetzteil, das die Stromspannung mit Hilfe eines Transformators für Gleichspannung (»Step-up-Converter«) von 0,9 Volt auf bis zu 14 Volt erhöhen kann und damit eine nahezu vollständige Ausnutzung der Energiekapazität einer Batterie ermöglicht. Besonders die Größe des Geräts sticht hervor: Es misst nicht mehr als einen Daumennagel. Damit das Netzteil nur dann genutzt wird, wenn man es wirklich braucht, bauten die beiden Schüler den weltweit kleinsten Vibrationsschalter ein. Diesen händigte das Institut für Prozessdatenverarbeitung des Forschungszentrums Karlsruhe nur unter strengsten Geheimhaltungsauflagen aus. Im Inneren des Vibrationsschalters bewegt sich eine Kugel und schließt und öffnet ständig einen Stromkreis. Am Ausbleiben solcher Schaltvorgänge merkt die Elektronik, dass beispielsweise ein Fahrrad nicht mehr benutzt wird, und schaltet deshalb das Rücklicht nach kurzer Zeit aus.

Die beiden 19-Jährigen entwarfen außerdem einen Adapter in der Größe einer normalen Batterie, in den das Miniatur-

PILLWATCHER

SÜSSE PFLÄNZCHEN

Jugend Innovativ

Österreichs größter Schulwettbewerb für Wissenschaft, Technik, Wirtschaft und Kunst wird in Auftrag gegeben vom Bundesministerium für Unterricht, Kunst und Kultur, das damit ursprünglich Schülern die Naturwissenschaften näherbringen wollte, und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit.

Jugendliche im Alter von 15 bis 20 Jahren können Projekte in den Kategorien »Science«, »Engineering«, »Design« und »Business« einreichen. Eine Auswahl der Einsendungen wird im Finale in Wien vorgestellt. Der Veranstalter unterstützt die Ideen finanziell; die Gewinner werden mit Geldpreisen belohnt und als Botschafter Österreichs zu internationalen Erfindermessen geschickt. Einige Unternehmen stiften Sonderpreise. Ideen fürs nächste Jahr können bis zum 21. Dezember 2007 eingereicht werden.

Jugend Innovativ
austria wirtschaftsservice
Ungarngasse 37
1030 Wien
Telefon: +43 1 501 75-514
Fax: +43 1 501 75-900
E-Mail: j.zach@awsg.at
www.jugendinnovativ.at

Schaltnetzteil integriert werden kann. Der Herstellungspreis von gerade einmal zwei Euro spricht für diese Erfindung, die bereits zum Patent angemeldet ist. Fritz Paschke von der Universität Wien überreichte den beiden Jungwissenschaftlern den dritten Preis in der Kategorie »Engineering« und musste dabei nicht ganz neidfrei zugeben: »Ich wüsste nicht, was man bei der Entwicklung hätte besser machen können, mich stört nur, dass ich nicht selbst auf die Idee gekommen bin.«

BIOGAS AUS MAISSTROH

Die praktische Umsetzbarkeit spielte auch beim Projekt von Martina Hafner und Ann-Christin Holzinger (beide 19) eine große Rolle. Sie widmeten sich der Frage, wie man aus zellulosereichen Pflanzenstoffen Biogas gewinnen kann.

Als Beispiel diente hierbei Maisstroh, das auf Grund seiner faser- und zellulosereichen Konsistenz dem Angriff der zersetzenden Bakterien lange standhält. Die beiden Schülerinnen aus Braunau am Inn erleichterten den Mikroben einerseits mit Lauge, andererseits mit Enzymen das Eindringen.

Neben den wissenschaftlichen Versuchen überprüften Hafner und Holzinger auch die Rahmenbedingungen in ihrer Umgebung. Mit der Gemeinde Braunau diskutierten sie über eine mögliche Biogasanlage und kalkulierten deren Kosten. In ganz Österreich fallen etwa 1,5 Millionen Tonnen Maisstroh an. Das ergäbe 500 Millionen Kubikmeter Biogas, die für die Versorgung von 150 000 Haushalten ausreichen würden.

Ein deutlicher Vorteil dieses Vorgehens ist, dass es ausschließlich pflanzliche Abfälle zur Gaserzeugung nutzt. Feldfrüchte, die eigentlich zur Ernährung geeignet sind, werden nicht benötigt.

Die Schülerinnen, die mehr als 1000 Stunden Arbeit in ihr Projekt investierten, erhielten für ihre Idee den zweiten Preis in der Kategorie »Science«.

PILLWATCHER

Dass Kläranlagen Probleme damit haben, Medikamentenwirkstoffe und andere Chemikalien aus dem Abwasser zu filtern, ist kein Geheimnis mehr. Welche Auswirkungen das jedoch für die Tier- und Pflanzenwelt der Flüsse und sogar für den Menschen haben kann, der das Wasser nach dem Durchgang durch die Aufbereitungsanlage wieder trinkt, ist lange nicht ausreichend erforscht. Einen Beitrag dazu leisteten Magdalena Wolf (19), Julia Gruber und Regina Itzinger (beide 17) aus Braunau, indem sie das künstliche Estrogen Ethinylestradiol (EE2), das in Antibabypillen verwendet wird, genauer unter die Lupe nahmen.

Durch seine stabile Molekülstruktur ist das Hormon nur schwer abbaubar. Es gibt jedoch verschiedene – sehr einfache und billige – Möglichkeiten, Fremdstoffe wie diesen zumindest nachzuweisen. Die drei Schülerinnen testeten und verbesserten die tierische Nachweismethode mit Wasserflöhen und untersuchten auch verschiedene Mikroben wie Milchsäure- oder Essigsäurebakterien auf ihre Nachweistauglichkeit.

Sie stellten sich als hervorragende Indikatoren für EE2 heraus. Auch bei Versuchen mit normaler Kresse konnten bei Kontakt mit dem Estrogen Veränderungen festgestellt werden.

Vor allem Aufmerksamkeit für das Problem wollen die drei jungen Frauen mit diesem Projekt erreichen. Ihrer Meinung nach werden die hohen Werte der Fremdstoffe in den Gewässern in Kauf genommen, ohne die Konsequenzen zu beachten. Seit Jahren beobachten Wissenschaftler, dass es immer mehr weibliche Fische gibt und sich damit das Geschlechtergleichgewicht verschiebt.

Sogar eine Parallele zu der zunehmenden Verringerung der Samenzellen von Männern zogen die drei Gewinnerinnen der Bronzemedaille in der Kategorie »Science«.

SÜSSE PFLÄNZCHEN

Klassenübergreifend machten sich 21 Schüler aus Elixhausen auf die Suche nach einer Alternative zu Zucker sowie synthetischen Süßstoffen und wurden in der Pflanzenwelt Paraguays fündig. Dort ist *Stevia rebaudania* zu Hause, deren Blätter Steviosid beinhalten, was 300-mal so süß ist wie Zucker und keine Kalorien hat. Klingt alles toll, wäre da nicht ein kleines Problem: Die Pflanze ist in Europa nicht als Nahrungsmittel zugelassen.

Studien sagen dem Abbauprodukt des Steviosids – Steviol – mutagene oder genotoxische Wirkung nach. Die aber sind umstritten, da in den Untersuchungen meist mit unrealistischen Mengen experimentiert wurde. Japaner setzen das Kraut schon seit Jahrzehnten als Süßungsmittel ein, Südamerikaner seit Jahrhunderten – ohne Nebenwirkungen.

Zwar konnten sie während des Projekts keine neuen Erkenntnisse über die Verträglichkeit des Süßstoffs gewinnen, in umfangreichen Laborversuchen räumten die Schüler aber mit dem Vorurteil auf, Steviosid bekämpfe Karies. Das ist falsch. Aber immerhin verhindert es die Bildung eines Bakterienfilms auf den Zähnen, Plaque genannt, der Karies verursachen kann, wie die 21 Nachwuchswissenschaftler herausfanden.

Noch 2007 soll übrigens erneut darüber beraten werden, ob der pflanzliche Süßstoff auch in Europa als Nahrungsmittel Einzug halten darf. ◁

Sebastian Hollstein ist freier Journalist in Jena.

AUTOR

AUF DEN NÄCHSTEN SEITEN FOLGT EIN SONDERTEIL VON SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT UND VDI NACHRICHTEN ▷

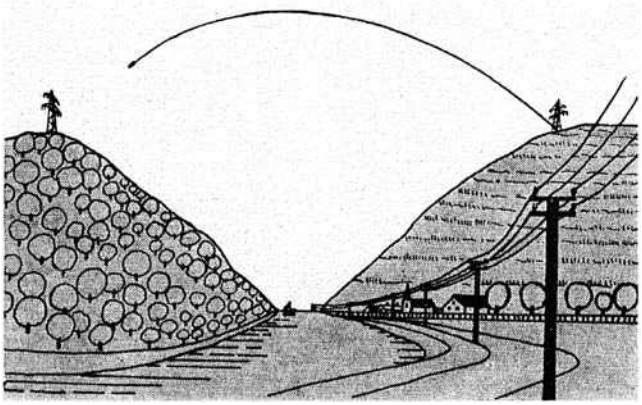
Gasspür-Farbstifte

»Aufbauend auf Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Abteilung für chemische Kriegsführung der amerikanischen Armee, nahm kürzlich … ein … US-Chemieunternehmen die Produktion von Gasspür-Farbstiften zum Nachweisen von Giftgas-Kampfstoffen … auf. Mit den Farbstiften werden auf beliebiges Material Striche gezogen. Sind in der Luft chemische Kampfstoffe oder giftige Industriegase enthalten, so verfärben sich die Striche in charakteristischer Weise.« *Orion, Jg. 12, Nr. 11, S. 922, November 1957*

Verkehrsstau elektrisch erfasst

»In London kontrolliert ein elektronisches Omnibus-Registriersystem die in den Straßen fahrenden Busse. Elektronenkameras, die entlang der Straßen aufgestellt sind, empfangen von jedem vorbeifahrenden Bus ein Signal. Der jeweilige Standort der Wagen wird selbsttätig an eine Zentrale weitergegeben. Auf diese Weise kann die Fahrt der Busse ständig verfolgt werden. Sobald eine Zusammenballung des Verkehrs oder eine andere Unregelmäßigkeit entsteht, kann von der Zentrale aus sofort eine Abhilfemaßnahme eingeleitet werden.« *Elektrotechnische Zeitschrift, Ausgabe B, Bd. 9, Nr. 11, S. 457, 21. November 1957*

Raketengetriebene Leinenschieß-Geräte



700 Meter mit einem Schuss: Das Leinenschieß-Gerät macht's möglich.

»Für die Bauindustrie, Elektrizitätswirtschaft, Nachrichtentechnik und das Seenot-Rettungswesen sind raketengetriebene Leinenschieß-Geräte entwickelt worden, mit deren Hilfe in kürzester Zeit Leinenverbindungen bis zu 700 Meter Länge hergestellt werden können. Der Technik und dem Seenot-Rettungsdienst eröffnen sich damit ganz neue Möglichkeiten. Die Raketen werden mit einer rückstoßarmen Spezial-Pistole aus der Hand oder über einen Gleitstab abgeschossen.« *Orion, Jg. 12, Nr. 11, S. 922, November 1957*

Rollende Schlittschuhe für die Straße

»Das Laufrad verdankt seine Entstehung der Überzeugung, dass es trotz aller bisherigen Misserfolge möglich sein sollte, die so sympathische Fortbewegung des Schlittschuhläufers auf dem Eise auch auf ebene Straßen und Bahnen etc. zu übertragen. … Das Laufrad besteht für jeden Fuss aus einem, an der Aussenseite desselben, schief gestellten Rads, das zum Fuss des Läufers so zu stehen kommt, dass dieser unter seiner Mitte, gleich wie beim Schlittschuh, gestützt wird … . Eine Rücklaufhemmung bringt das Rad absolut zum Stehen, sobald es zum Stosse im Sinne einer Rückwärtsbewegung und Drehung angesetzt wird.« *Die Umschau, Jg. 11, Nr. 48, S. 954, 23. November 1907*

Laufrad mit Rücklaufhemmung

Saturnringe aus Kleinstteilchen

»Theoretisch stand … nach der Mechanik des Himmels fest, dass dort eine feste Scheibe gar nicht existieren könne. Tatsächlich ist es jetzt gelungen, dies praktisch darzutun. In der Woche vom 20. zum 27. Oktober sind nämlich … Teile der Ringe gesehen worden und zwar in Form von je zwei hellen Knoten zu beiden Seiten des Planeten, die symmetrisch zum Planetenrande lagen. Hiermit ist der Beweis erbracht, dass die Ringe wirklich aus lauter selbständigen kleinen Körperchen bestehen, die nach den Gesetzen der Gravitation umlaufen wie die grossen Monde.« *Die Umschau, Jg. 11, Nr. 47, S. 940, 16. November 1907*

Die erste europäische Ingenieurin

»Bisher wurde die Ingenieurwissenschaft, speciell Elektrotechnik und Maschinenbau vollständig nur von Männern ausgeübt … . Die … junge Dame dagegen hat in der Schweiz ihr Ingenieur-Studium durchgemacht um sich dem Beruf als Ingenieuse zu widmen. Fräulein Cécile Butticaz ist in Genf 1884 als Tochter des Directors der industriellen Betriebe der Stadt geboren. … Sie hat die Universität in Genf und darauf 4 Jahre die Ingenieurschule der Universität Lausanne besucht. In diesem Sommer beendigte sie ihre Studien und legte ihr Diplomexamen als Ingenieur électricien ab.« *Zeitschrift für Elektrotechnik und Maschinenbau, Jg. 24, Bd. 10, Nr. 45, S. 491, 6. November 1907*

BLICK IN DIE TIEFE

Was seit Jahrzehnten schon erwartet wurde, ist jetzt möglich: Maschinen stellen bewegte Objekte in echten drei Dimensionen dar.

CHRISTOPHER HARTING

Das volumetrische Display PerspectaRad bietet ein räumliches, aus Computertomografie-Daten errechnetes Bild eines Kopfes. Grün eingeblendet sind mögliche Strahlführungen für die radiologische Behandlung eines Tumors tief im Inneren des Gehirns (gelb).

Von Stuart F. Brown

Stereobildpaare sind eine gute alte Erfindung und benötigen nicht mehr Hardware als ein Blatt Papier. Zwei Bilder, eins für jedes Auge, werden im Gehirn des Betrachters zu einem räumlichen Gesamteindruck zusammengesetzt. Die hochtechnisierte Variante ist das bewegte Stereobildpaar: Zwei Miniaturbildschirme in einer Gesichtsmaske spielen jeweils einem Auge das richtige Bild vor. Ein Computer hat gewissermaßen einen dreidimensionalen Gegenstand im Sinn, berechnet die beiden geringfügig verschiedenen Ansichten, die zwei echte Augen von diesem Gegenstand gewinnen würden, und beliefert damit die beiden Bildschirme. Dabei kann der »gedachte« Gegenstand sich auf Anweisung des Betrachters bewegen oder sonst wie verändern.

Diese Technik ist inzwischen ziemlich ausgereift, aber nicht besonders teamfähig. Nur ein Anwender auf einmal kann mit dem interaktiven 3-D-Kino arbeiten. Größere Gruppen müssen sich mit einer Rot-Grün-Brille oder aufwändigerem Gerät behelfen, um von zwei auf die Leinwand projizierten Bildern jeweils eins auf das zuständige Auge zu lenken und das andere für dieses Auge auszublenden.

Andere Techniken zur Herstellung dreidimensionaler Ansichten leiden ebenfalls unter Mängeln. Holografische Bilder werden als Einzelstücke angefertigt und sind nicht beweglich. Ingenieure haben auch schon mit rotierenden Anordnungen von Leuchtdioden in einem Glaskasten eine Ganzkörperansicht erzeugt. Die ist jedoch grobkörnig, weil die Dioden mitsamt den Zuleitungen nicht hinreichend klein hergestellt werden können. Das Heliodisplay von IO2 Technology aus San Francisco projiziert Bilder auf einen feinen, über dem Gerät erzeugten Nebel. Aber der so erzeugte Tiefeneindruck ist nur eine Illusion.

In keinem Fall kann man um den abgebildeten Gegenstand einfach herumgehen, um sich im Wortsinn ein vollständiges Bild von ihm zu machen. Dabei ist der Bedarf für ein solches Wunderwerk durchaus vorhanden. Chemiker könnten damit neuartige Wirkstoffmoleküle entwerfen. Wer ein potenzielles

Öl- oder Gasfeld durch seismische Messungen erkundet hat, würde dem dreidimensionalen, computererzeugten Datensatz ansehen, wohin er seine Bohrer lenken soll. Ein Arzt könnte einen Eingriff mit einer Sonde oder einem Röntgenstrahl zunächst zur Probe an einem Stapel tomografischer Daten ausführen und erst dann am echten Patienten.

Vor Kurzem haben nun zwei amerikanische Firmen neue interaktive Systeme entwickelt, so genannte volumetrische 3-D-Displays, welche die Beschränkungen der bisherigen Systeme überwinden. Herzstück beider Geräte ist der Digital Light Processor (DLP) von Texas Instruments, der auch in Videoprojektoren und Rückprojektionsbildschirmen steckt. Hinzu kommen Eigenentwicklungen der Firmen. Beide Produkte sind auf dem Weg in die Serienfertigung.

Bestrahlung von Tumoren

Das System Perspecta von Actuality Systems in Bedford (Massachusetts) sieht auf den ersten Blick aus wie eine überdimensionierte Kristallkugel (Bild links). Unter einer Kuppel aus glasklarem Polykarbonat rotiert eine aufrecht stehende Mattscheibe von 25 Zentimeter Durchmesser mit etwa 900 Umdrehungen pro Minute um eine vertikale Achse (Kasten rechts).

Abgebildet wird typischerweise ein Teil des menschlichen Körpers; die Rohdaten sind die Ergebnisse einer (Röntgen-, Magnetresonanz- oder Positronenemissions-)Tomografie (CT, NMR oder PET). Eine solche Untersuchung produziert einen »Datenquader«; den darf man sich als aus kleinen Würfeln (»Voxeln«) bestehend vorstellen, die jeder einen Farbwert tragen. Dieser Quader wird nun in Gedanken in 198 sehr dünne Apfelsinenschnitze zerschnitten; aus den Originaldaten errechnet der Computer den Anblick, den jede Schnittfläche bietet, und projiziert diesen Anblick in genau dem Augenblick auf die rotierende Scheibe, in dem diese im richtigen Winkel steht.

Entsprechend der Bewegung der Scheibe muss der Bildwechsel sehr schnell sein. Das leistet der Digital Light Processor: Er besteht aus Hunderttausenden winziger Spiegel, die unabhängig voneinander gekippt werden können. Die aktuellen DLPs haben 786 432 Spiegel auf der Fläche eines Fingernagels. Ein Kippvorgang benötigt nur 16 Mikrosekunden. Je nachdem, ob ein solcher Spiegel gekippt ist oder nicht, fällt das Licht auf die Projektionsfläche oder ins Leere. In Perspecta stecken drei derartige DLPs; sie erzeugen Teilbilder in den Farben Rot, Grün und Blau, aus denen – wie beim Farbfernseher – das Gesamtbild zusammengesetzt wird.

Viel mathematische Schwerstarbeit war nötig, um Perspecta zum Laufen zu bringen. »Wir haben drei bis vier Jahre gebraucht, nur um die Algorithmen zu finden, mit denen die Bilddaten auf die Schnittflächen umgerechnet werden«, sagt Gregg E. Favalora, der Cheftechnologe von Actuality. »Zum Beispiel haben wir ein Patent auf ein Verfahren, eine Gerade auf einem rotierenden Schirm zu zeichnen. Es ist nämlich keineswegs offensichtlich, welchen Punkt man dafür in jedem der Einzelbilder wählen muss.«

Das von Perspecta dargestellte Objekt wirkt wie eine selbstleuchtende, halb transparente Wolke. Jedes Voxel, das an einer bestimmten Stelle im Raum zu sein scheint, befindet sich auch wirklich dort; es wird aber nur sichtbar, wenn der Schirm diese Stelle überstreicht – deshalb die hohe Drehzahl. Die Mattscheibe lässt einen Teil des Lichts durch und reflektiert den anderen; dadurch zeigt sie auf beiden Seiten ein Bild, und man sieht das Objekt aus jeder Position vor dem Gerät. Bewegt man den Kopf, so werden Objektteile im Hintergrund sichtbar, die vorher vom Vordergrund verdeckt waren – wie in der Wirklichkeit.

Der Anwender kann mit einer stiftartigen Maus das abgebildete Objekt drehen, kippen, zur genaueren Betrachtung auf sich zu bewegen und sogar seine Farben ändern. Diese Möglichkeit ergab sich erst vor kurzer Zeit durch die rasanten Fortschritte der Computergrafik. »In unserer ersten Demo-Version aus dem Jahr 2002«, erinnert sich Favalora, »brauchte das Gerät 45 Minuten, um eine neue Perspektive zu berechnen. Heute erledigt das eine übliche Videokarte für ein paar hundert Dollar im Nu.«

Es dauerte auch einige Zeit, bis Favalora und seine Kollegen begriffen, dass es für einen Geschäftserfolg nicht ausreichen würde, die Technik zu perfektionieren; es galt zugleich, einen Markt zu finden, der dafür Verwendung hatte, und diesen mit einem anwendungsreifen System zu bedienen.

Die Bestrahlungstherapie für Tumoren erwies sich als eine solche Nische. Die Ärzte müssen nämlich den Weg der zerstörerischen Strahlen sorgfältig planen, damit sie im Tumor zusammentreffen und dort ihre maximale Wirkung entfalten, überall sonst aber möglichst wenig Schaden anrichten. Aus den üblichen zweidimensionalen Schnittbildern durch das Bestrahlungsgebiet eine klare Vorstellung von den räumlichen Verhältnissen zu gewinnen ist schwierig (für alternative Darstellungsverfahren siehe jedoch Spektrum der Wissenschaft 12/1999, S. 78, 9/2001, S. 46, und 12/2006, S. 97). So kann die Planung

Perspecta: die Kristallkugel

Eine transparente Kuppel, eine Mattscheibe und Umlenkspiegel rotieren gemeinsam mit 900 Umdrehungen pro Minute; dadurch entsteht das dreidimensionale Bild. Ein Computer schickt die Grafikdaten an die Elektronik im Sockel des Geräts; die wiederum steuert die drei DLP-Chips an (einen für jede der Farben Rot, Grün und Blau). Das Licht einer Bogenlampe wird über die DLP-Chips auf eine Projektionslinse und weiter nach oben durch die Rotationsachse und über die Umlenkspiegel bis auf den Schirm gelenkt. Zur Sicherheit umschließt eine zweite größere Kuppel (nicht im Bild) die rotierenden Teile.

SW INFOGRAPHICS, NACH: ACTUALITY SYSTEMS

Die aussichtsreichsten Märkte sind, wie üblich, da, wo das Geld ist: ***Medizin, Militär und Film***

des Strahlenverlaufs mehrere Stunden in Anspruch nehmen.

Actuality entwickelte deshalb ein Zusatzgerät namens PerspectaRad für eine existierende Strahlentherapieanlage von Philips Medical Systems. Das dreidimensionale Display wird über eine Software an das Philips-System angekoppelt. Auf Knopfdruck erscheint etwa das aus den CT-Daten errechnete dreidimensionale Bild eines Gehirntumors. Ein weiterer Knopfdruck, und der gewählte Strahlenweg wird sichtbar. So kann der Arzt genau erkennen, wo die Strahlen den Tumor treffen und durch welches gesunde Gewebe sie verlaufen, und die Strahlung auf ein optimales Verhältnis von Erfolg zu Schaden justieren.

Die ersten PerspectaRad-Systeme kosten ungefähr 90 000 Dollar. Laut Favalora könnte dieser Betrag durch Serienproduktion zwar auf 65 000 Dollar sinken; aber selbst das wird niemand ausgeben wollen, nur um echt dreidimensionale Computerspiele im heimischen Wohnzimmer darauf ablaufen zu lassen.

Auf jeden Fall wird die Medizin profitieren. James Chu, der Leiter der Abteilung für Medizinische Physik an der Rush-Universität in Chicago, ließ kürzlich bei zwölf Patienten mit Gehirntumoren Behandlungspläne sowohl mit PerspectaRad als auch auf herkömmliche Weise ausarbeiten. In der Doppelblind-Bewertung – die Gutachter wussten nicht, welcher Plan wie zu Stande gekommen war – schnitten die mit PerspectaRad entwickelten Protokolle in sechs Fällen besser und in zwei Fällen schlechter ab als die konventionellen; in den vier restlichen Fällen waren sie annähernd gleichwertig. Bei einem Patienten zeigte PerspectaRad eine Möglichkeit, die Nebenwirkungen für den Sehnerv zu reduzieren. Chu plant eine umfangreichere Studie, die auch Patienten mit Tumoren in anderen Körperteilen umfassen soll. »Wenn man mit CT-Daten arbeitet«, sagt er, »sieht man viele einzelne Schichten und muss sie irgendwie im Kopf integrieren, um eine räumliche Vorstellung zu bekommen. Mit Perspecta hat man direkt das dreidimensionale Bild vor Augen.«

Besonders reizvoll findet Chu die Möglichkeit, mit Perspecta bewegte Bilder darzustellen. Durch Atmung und Herzschlag sind Lunge und Herz sowie die umgebenden Organe in ständiger Bewegung. Da kann es sehr hilfreich sein, die Bewegungsachse eines Tumors zu erkennen. Ein Strahl, der entlang dieser Bahn geführt wird, kommt für den gleichen Effekt mit weniger Energie aus als ein quer zur Bahn verlaufender und verursacht weit weniger Kollateralschäden. Auch die Brachytherapie, die Implantation kleiner radioaktiver Strahler (»Seeds«) in die von einem Tumor befallene Prostata, könne von Perspecta profitieren, weil man die durch das Einführen der Injektionsnadel verursachte Gewebebewegung besser kompensieren könne.

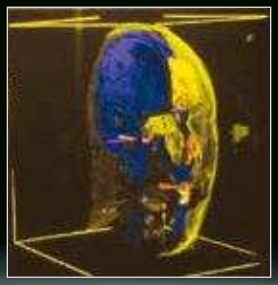
Voxels in Glasplatten

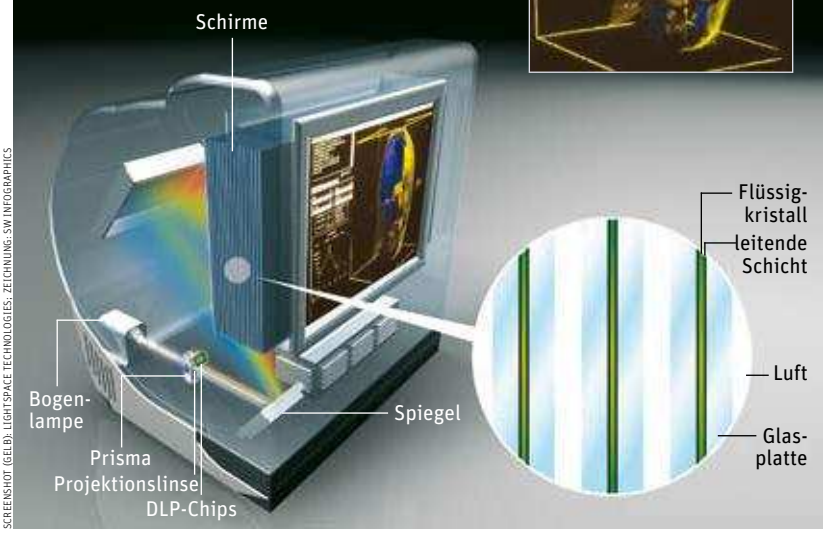
Das andere interaktive volumetrische Display heißt DepthCube und wurde von LightSpace Technologies in Norwalk (Connecticut) entwickelt. Von außen sieht es aus wie ein gewöhnlicher Computerbildschirm im Format 40 mal 30 Zentimeter. Allerdings ist die leuchtende Fläche ziemlich dick: Es handelt sich um 20 hintereinander angeordnete Glasplatten, die jede die Eigenschaften eines Flüssigkristallbildschirms haben (Kasten links). Mitsamt den Luftschichten dazwischen kommt der Stapel auf eine Dicke von 10 Zentimetern; trotzdem scheint das Bild eine Tiefe von 30 Zentimetern zu haben. Von jedem Standpunkt vor dem Schirm sieht man das Objekt aus der richtigen Perspektive. Wandert man vor dem Schirm hin und her, so scheinen sich die vorderen Bildteile schneller in Gegenrichtung zu bewegen als die hinteren, wie in der Wirklichkeit. Das System

DepthCube: der Dickbildschirm

Das Licht einer Bogenlampe wird durch ein Prisma in einen roten, einen grünen und einen blauen Anteil zerlegt. Diese verlaufen über je einen DLP-Chip, eine Projektionslinse und Umlenkspiegel und beleuchten von hinten einen Stapel aus zwanzig Bildschirmen. Jeder von ihnen besteht aus zwei Glasplatten, zwischen denen die Flüssigkristallschicht liegt (Spektrum der Wissenschaft 4/2001, S. 117). Aus Lichtpunkten in verschiedenen Schirmen entsteht ein dreidimensionales Bild, das 30 Zentimeter tief erscheint.

In dem Beispielbild rechts ist die Hälfte eines Menschenkopfes dargestellt. Dabei können spezielle Strukturen sichtbar gemacht (die Nasennebenhöhlen leuchtend gelb, Knorpel orange) und andere ausgeblendet werden.





SCREENSHOT (GELB): LIGHTSPACE TECHNOLOGIES; ZEICHNUNG: SW INFOGRAPHICS

Spektrum campus

Die Wahl des richtigen Studienfaches und die richtigen Weichenstellungen im Verlauf eines Studiums können zu den wichtigsten Entscheidungen im Leben eines Menschen zählen.

Das Ziel unseres neuen Internetportals Spektrum Campus ist es, bei diesen Überlegungen zu helfen. Der Schwerpunkt des Projektes liegt nicht in trockenen Informationen, sondern bewusst im Wissenstransfer von Mensch zu Mensch:
Professoren und Studierende schreiben über ihre persönlichen Ansichten zu den verschiedenen Themenbereichen und laden zum Meinungsaustausch ein.

www.spektrum-campus.de

könnte zum Beispiel einem Team von Ingenieuren sehr plastisch zeigen, wie die einzelnen mit einem CAD-System entworfenen Teile zusammenpassen – oder auch nicht.

Als Alan Sullivan, der Präsident von LightSpace, vor acht Jahren den ersten Prototyp baute, brachte er drei DLP-Chips dazu, in rascher Folge die 20 Glasplatten mit dem zu der entsprechenden Tiefe gehörigen Teilbild zu beleuchten. Synchron dazu wurde die jeweils angesprochene Platte auf elektrischem Weg von ihrem transparenten Ruhezustand in den milchigen, Licht streuenden Zustand umgeschaltet. Tausend Bilder pro Sekunde über 20 Platten verteilt ergeben eine Bildfolge von 50 dreidimensionalen Gesamtansichten pro Sekunde.

Das übliche Datenrohmaterial besteht aus gewöhnlichen zweidimensionalen Bildern, auch wenn der Computer sie zuvor aus einem dreidimensionalen Szenario errechnet hat. Für die Tiefeninformation, die in der Datenstruktur noch vorhanden ist, hat eine zweidimensionale Darstellung ja keine Verwendung. Aber Sullivan erkannte erleichtert, dass diese Tiefeninformation von den meisten computergrafischen Algorithmen bis in die Grafikkarte mitgeschleppt wird, die ihrerseits den Monitor mit der Farbinformation bedient. Wenn ein Programm einen Bildpunkt (ein »Pixel«) mit einer Farbe versieht, schreibt es nicht nur diese Farbe an die entsprechende Stelle der Grafikkarte, sondern auch in deren so genannten Tiefenpuffer *(depth buffer)* die Tiefe, also die Entfernung des abgebildeten Punkts von einer gedachten Ebene. Gerät im weiteren Verlauf ein weiterer Farbpunkt auf dasselbe Pixel, so gewinnt derjenige mit der geringeren Tiefe; so verdeckt ein Vordergrundobjekt ein Hintergrundobjekt, einerlei, in welcher Reihenfolge beide vom Programm erzeugt werden. Sullivan musste also diese Tiefeninformation nur abzweigen und mit ihrer Hilfe den Bildpunkt dem richtigen unter seinen 20 Schirmen zuweisen.

Der erste Prototyp des DepthCube zeigte dem Betrachter sehr anschaulich drei Dimensionen, aber nur mit der echten Tiefe des Geräts: 10 Zentimeter. Die Teile eines Bilds erschienen eher wie Kulissen auf einer Bühne, die einfach hintereinander aufgestellt sind. Da hatte Sullivan, der zuvor am Lawrence-Livermore-Nationallaboratorium mit Ultrahochenergielasern gearbeitet hatte, eine Idee, die ihm sogar ein Patent einbrachte. Er erinnerte sich an die so genannten Antialiasing-Algorithmen, die man zur Glättung gezackter Linien in zweidimensionalen Bildern einsetzt. Mit ihrer Hilfe ließen sich tatsächlich auch die Übergänge zwischen den 20 Platten des DepthCube fließender gestalten. Aus den echten 15,3 Millionen physikalischen Voxeln des Displays werden dadurch wahrgenommene 465 Millionen. »Wir erzeugen zwischen den physikalischen Ebenen noch 31 Zwischenschichten; dadurch wird die wahrgenommene Auflösung erheblich vergrößert«, erklärt Sullivan. Im Ergebnis erscheinen die Bilder dem menschlichen Gehirn mit der dreifachen Tiefe – 30 statt 10 Zentimeter.

Wegen des Tricks mit dem Tiefenpuffer dürfen die Bilddaten von fast jeder 3-D-Software stammen. Sie muss nur mit der OpenGL-Schnittstelle kompatibel sein, einem verbreiteten Protokoll. LigthSpace hat bisher eine Hand voll von DepthCubes an Forschungsinstitute verkauft, darunter das Forschungszentrum der US-Luftwaffe und die Universität Hokkaido in Japan. Beim derzeitigen Stückpreis von 50 000 Dollar ist der Markt begrenzt; aber Sullivan hält einen Preis von 5000 Dollar für ein Massenprodukt für denkbar. »Bis auf die Flüssigkristall-Umschaltung hat unsere Konstruktion nichts, das sich wesentlich von einem Flachbildfernseher unterscheidet«, sagt er, »und die könnten in großen Stückzahlen ziemlich billig produziert werden.«

Die von diesen beiden Firmen entwickelten Produkte ernten bei den Experten viel Anerkennung, und weitere Anwendungen werden sicher folgen. Steve Hines, Spezialist für Optik und Inhaber des HinesLab in Glendale (Kalifornien) meint, dass »beide Gruppen äußerst komplizierte Probleme bearbeiten und dabei sehr erfolgreich sind«. Aussichtsreiche Märkte seien, wie üblich, da, wo das Geld ist: »Medizin, Militär und Film.« ◁

3-D-Displays: deutsche Entwicklungen

Ein autostereoskopisches Display (Spektrum der Wissenschaft 3/2004, S. 76) arbeitet nach dem Prinzip der Postkarte, die je nach der Richtung, aus der man sie betrachtet, zwei verschiedene Bilder zeigt. Ein Flachbildschirm strahlt verschiedene Bilder in verschiedene Richtungen ab. Je zwei dieser Bilder treffen die Augen des Betrachters und ergeben ein Stereobildpaar, und zwar je nachdem, wie schräg er den Bildschirm anschaut, verschiedene Bildpaare. Der führende Hersteller Newsight GmbH in Jena erreicht die Bildervielfalt durch einen »Lattenzaun«, dessen sehr schmale Latten in jeder Richtung nur das richtige Bild durchlassen. Er bietet Geräte von 21 bis 140 Zentimeter Bilddiagonale an, auf Anfrage auch ganze Schauwände mit 4,60 Meter. Andere Hersteller arbeiten mit Zylinderlinsen oder Prismen anstelle der Latten.

In dem System Felix3D rotiert an Stelle der ebenen Mattscheibe eine Schraubenfläche (Spektrum der Wissenschaft 1/1996, S. 24).

Der »Bollograph« der mittelständischen Firma soscho GmbH in Weilheim (Oberbayern) beleuchtet die bewegliche Mattscheibe nicht mit DLP-Spiegeln, sondern mit einem Feld aus Leuchtdioden, deren Licht durch zwei synchron mit der Mattscheibe bewegte Fresnelscheiben an die richtige Stelle gelenkt wird. Das in der Entwicklung befindliche Gerät soll ein sehr lichtstarkes, bei Tageslicht betrachtbares Bild liefern. *Christoph Pöppe*

Stuart F. Brown war Redakteur bei »Popular Science« und »Fortune«. Seine Themengebiete als freier Autor beschreibt er selbst als »die vom Menschen geschaffene Welt«, darunter insbesondere Luftfahrt, Transport und Biotechnologie.

A method for the real-time construction of a full parallax light field. Von K. Tanaka und S. Aoki in: Stereoscopic displays and virtual reality systems XIII. Von A. J. Woods et al. (Hg.). Proceedings of the SPIE, Bd. 6055, Artikel 605516, 30. Januar 2006

Volumetric 3D displays and application infrastructure. Von Gregg E. Favalora in: Computer, Bd. 38, Nr. 8, S. 37, August 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/905472.

SIEGEL

Klare Botschaft: Rührmichnichtan

Siegel aus Blei, Papier oder Kunststoff sollen verhindern, dass Produkte manipuliert werden.

Von Bernhard Gerl

Mitunter lohnen Verbrechen nur, wenn sie unbemerkt bleiben, von der manipulierten Wasseruhr über die Fälschung eines Testaments bis zum Drogenschmuggel in einem vom Zoll bereits abgenommenen Container. Als Gegenmittel sollen Siegel und Plomben jeden Einbruch sofort offenkundig machen. Denn sie sind Teil eines Verschlusses und werden beim Öffnen zerstört oder doch zumindest verändert.

Die Idee ist gut 5000 Jahre alt: Schon die Beamten der Stadtstaaten Mesopotamiens überwachten die Vorratskammern und -behälter eines Palasts mit Hilfe einer Versiegelung. Dazu pressten sie etwa einen Tonklumpen auf einen Türriegel und prägten ihn mit ihrem Rollsiegel. War der Batzen trocken, ließ sich die Tür nicht öffnen, ohne den Ton zu zerbrechen. Der gleichen Idee folgten auch Siegel aus heißem Wachs oder Lack, mit denen Briefe und Urkunden verschlossen wurden.

Heute verplomben Zollbeamte zum Beispiel – dann als »kontrolliert« gekennzeichnete – Lastwagen mit einem Siegel aus Blei (lateinisch *plumbum*) oder aus Weichaluminium. Plomben schützen auch Strom- und Wasserzähler gegen Manipulation. Die heutzutage vielleicht häufigste Form des Siegels besteht aber aus Papier- oder Plastikstreifen: Frischesiegel. Sie sollen die Unversehrtheit von Lebensmittelverpackungen garantieren.

Siegel verhindern Betrug, sichern technische Anlagen und vereiteln die Umgehung von Zollbestimmungen. Deshalb ist das unberechtigte Brechen eines Siegels in Deutschland strafbar. In Paragraf 136 des Strafgesetzbuchs heißt es dazu: »Ebenso wird bestraft, wer ein dienstliches Siegel beschädigt, ablöst oder unkenntlich macht, das angelegt ist, um Sachen in Beschlag zu nehmen, dienstlich zu verschließen oder zu bezeichnen, oder wer den durch ein solches Siegel bewirkten Verschluss ganz oder zum Teil unwirksam macht.«

Doch oft winken gute Geschäfte bei geringem Risiko. Beispiel Frischesiegel: Es ist so unauffällig, dass seine spurlose Entfernung kaum einem Kunden auffallen dürfte. Auch originale Medikamentenpackungen lassen sich leicht mit minderwertigen Fälschungen befüllen. Experten gehen davon aus, dass nicht einmal jede zweite in Afrika gehandelte Malariatablette den gewünschten Wirkstoff enthält. Mit Medikamentenplagiaten machen Verbrecher vermutlich weltweit einen Gewinn von mehreren Milliarden Euro jährlich.

Der amerikanische Sicherheitsexperte Roger Johnston und sein Team haben 244 verschiedene Siegelkonzepte getestet, darunter 46, die nukleares Material sichern und seine Weiterverbreitung verhindern sollen. Die erschreckende Erkenntnis: Jedes ließ sich entweder umgehen oder doch zumindest fälschen, und das nach durchschnittlich etwa zwei Stunden Suche nach der besten Methode. Mit dieser dauerte es dann gerade einmal eineinhalb Minuten, das jeweilige Siegel zu knacken.

Manchmal brachten die Forscher anschließend ein altes Siegel an und konnten so ihren Angriff verschleiern. Dem beugen beispielsweise mehrschichtige Siegel vor, deren einzelne Lagen mit Mikrotext oder Lumineszenzfarben bedruckt sind – einmal gebrochen, sind diese Schichten nicht mehr exakt übereinander zu positionieren und ihre Verschiebung gegeneinander lässt sich sichtbar machen. Doch die größte Schwachstelle ist der Mensch, der Siegel und Verschlüsse in Augenschein nimmt. Wenn auf der Arzneipackung ein Hologramm glitzert, ist das nicht schon ein Beweis der Unversehrtheit? Und nur wenn der Zollbeamte im Hamburger Hafen genau weiß, wie das Siegel seiner kolumbianischen Kollegen aussieht, vermag er eine Fälschung zu erkennen.

Verlässlicher als rein mechanische sind deshalb elektronische Siegel. Diese werden meist im Inneren eines Transportbehälters installiert, wo sie einen Einbruch über integrierte Sensoren registrieren, etwa plötzlich einfallende Helligkeit mittels Fotosensor. Ein Beamter kann per Funk das Siegel auslesen. Verzeichnete es kein Ereignis, sendet es ein bestimmtes Kennwort zurück, andernfalls bleibt die Elektronik stumm. Doch vielleicht verfügt der Kriminelle über die Mittel, den Speicher wieder »zurückzustellen«? Auch dagegen ist ein Kraut gewachsen: Beim Öffnen des Behälters wird ein Buchstabenkode berechnet und auf einem Display dargestellt. Ob es der richtige ist, kann nur derjenige beurteilen, der auch den bei der Berechnung verwendeten Zahlenschlüssel kennt.

Bernhard Gerl ist Technikpublizist in Mainz.

Zollbeamte haben den Inhalt eines Lastwagens überprüft und versiegeln die Ladetür, um sicherzustellen, dass auf dem Weg zum Bestimmungsort keine Fracht ausgetauscht oder hinzugefügt wird.

(a) Meist verwenden die Beamten Plomben aus Plastik, Blei oder Weichaluminium, in die sie mit einer speziellen Zange einen Kode einprägen.

(b) Auch die Fracht selbst kann auf diese Weise geschützt sein. So erschweren es Siegel aus Folien, Medikamente in Originalverpackungen gegen Fälschungen auszutauschen.

(c) Ein Siegel aus Hologrammfolie und RFID-Chip verhindert Autodiebstahl. Die elektronisch gespeicherten und verschlüsselten Angaben lassen sich mit entsprechenden Lesegeräten abfragen.

(d) Noch nicht in der Anwendung sind elektronische Siegel, die das Öffnen eines versiegelten Containers über Sensoren registrieren und aus der Uhrzeit (hier: 10.30 Uhr) anhand eines Zahlenschlüssels (hier: 97216) einen Buchstabenkode errechnen; der Schlüssel wird danach gelöscht. Nur wer ihn kennt, kann feststellen, ob der angezeigte Buchstabe geändert wurde.

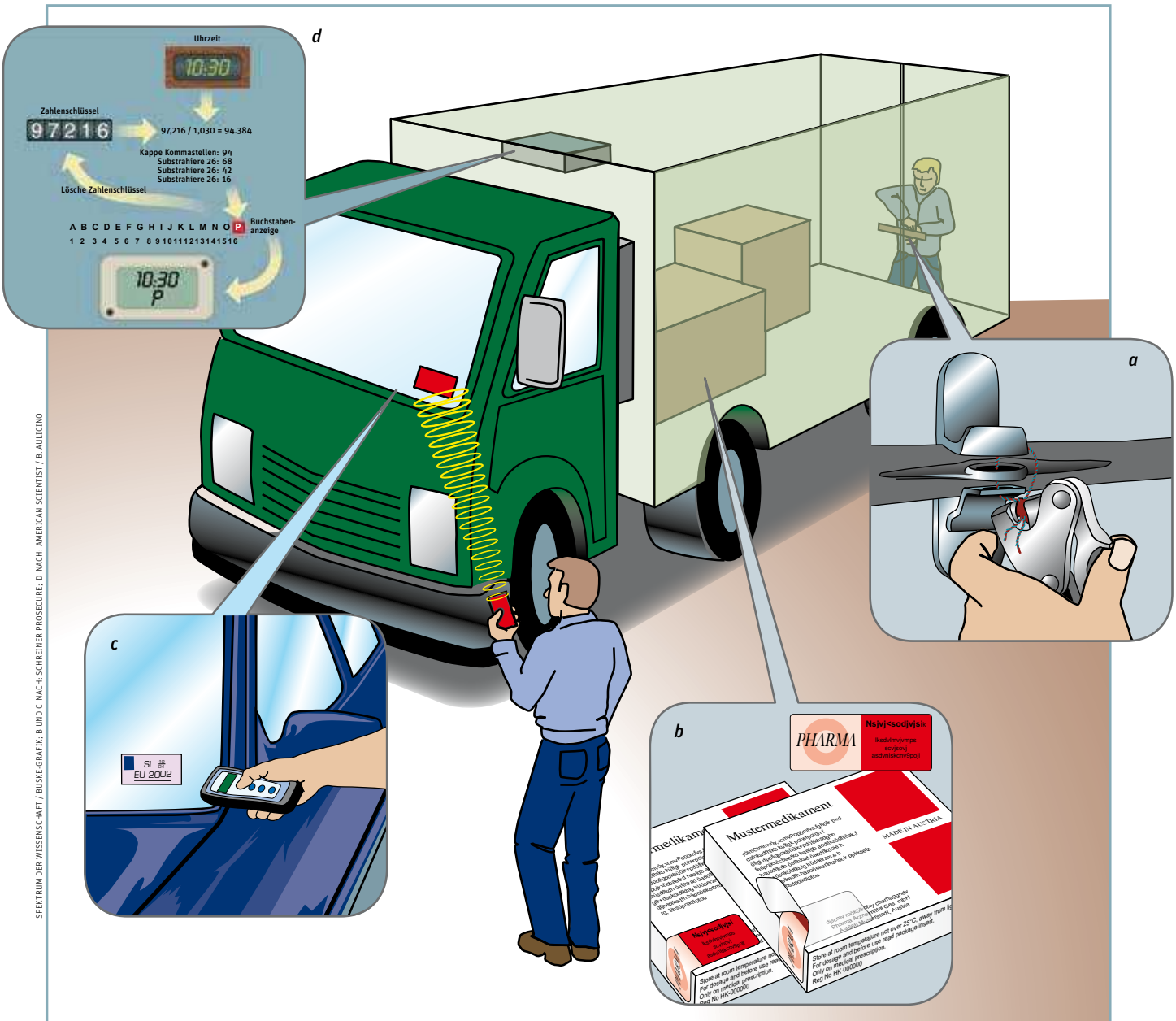
Wussten Sie schon?

Ein Dienstsiegel ist das Symbol eines Amtes, das meist ein Hoheitszeichen wie den Bundesadler oder ein Landeswappen abbildet und so Dokumente als rechtsverbindlich kennzeichnet. Dienstsiegel gibt es als Plattenabdruck, also als Stempel oder farblose Prägung, als Aufkleber mit vielen Sollbruchstellen oder gedruckt wie bei Banknoten. Berüchtigt ist der Kuckuck, ein Aufkleber, der bei Pfändungen auf konfiszierte Gegenstände geklebt wird. Der Name leitet sich vom preußischen Adler ab, der früher darauf abgebildet war. Heute steht nur noch »Pfandsiegel« darauf.

Der Siegelring des Papstes wird auf Grund zweier Abbildungen darauf auch Fischerring genannt: ein Fisch – seit der Antike ein Symbol für das Christentum – sowie der fischende Apostel Petrus – laut dem Lukasevangelium von Jesus zum »Menschenfischer« berufen. Der Ring wird dem Kirchenoberhaupt bei der Amtseinführung überreicht und nach seinem Tod mit einem silbernen Hammer zerschlagen.

Der deutsche Sicherheitsspezialist Schreiner ProSecure bietet verschlüsselte Produktnummern zur Nachverfolgung über das Internet an. Dieser Sicherheitskode, beispielsweise in einem Hologramm ablesbar, kann über ein Callcenter oder eine Webseite überprüft werden. Jede Abfrage wird registriert, und bei Überschreiten einer Maximalzahl werden die Verbraucher gewarnt.

Wer klagt, ein Sachverhalt sei ihm ein Buch mit sieben Siegeln, übertreibt gewaltig. Denn dieses im Neuen Testament erwähnte Werk kann erstens ohnehin nur vom Sohn Gottes geöffnet werden. Zweitens setzt dieser damit der Welt ein Ende: Der Bruch der ersten vier Siegel setzt die Apokalyptischen Reiter frei, nach dem fünften verlangen die Märtyrer Vergeltung. Bricht das sechste Siegel, bebt die Erde, die Sonne verfinstert sich, der Mond wird blutrot und die Sterne fallen vom Himmel. Zerstört Christus das letzte Siegel, erscheinen acht Engel und vernichten die Welt.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK; B UND C NACH: SCHREINER PROSECURE; D NACH: AMERICAN SCIENTIST / B. AULICINO

HISTOLOGIE

Ein ganz besonderes Tier-Bilderbuch

Anhand von hunderten histologischen Schnitten veranschaulichen die Autoren die Anatomie der Tiere – und insbesondere der Wirbellosen.

Niemand weiß genau, wie viele Tierarten eigentlich unsere Erde bewohnen. Sicher ist nur, dass die allermeisten Arten zu den Wirbellosen gehören. Und genau diese werden in Lexika, der populärwissenschaftlichen Literatur und auch in manchen Lehrbüchern nicht gebührend berücksichtigt. Bilder von Säugern füllen Bände oder doch zumindest breitformatig ganze Seiten – der kleine Eisbär Knut ist ein Medienereignis –; dabei gibt es von ihnen nur etwa 5000 Arten. Die Besprechung von Insekten, von denen weit über eine Million Arten bekannt sind und immer noch neue entdeckt werden, nimmt in der gängigen Literatur wesentlich weniger Raum ein, gar nicht zu reden von den vielen anderen Wirbellosen, die sich auf unserem Planeten tummeln.

Erst recht nicht gab es bisher ein Buch, welches in Gestalt enorm vieler histologischer Schnitte und einiger mikroskopisch kleiner Totalpräparate Ausschnitte des gesamten Tierreichs zeigt, die Wirbellosen in hinreichender Ausführlichkeit eingeschlossen. Endlich ist eine schon lange klaffende Lücke in der Literatur geschlossen worden. Dem Histologen Heinz Streble von der Universität Hohenheim (nicht nur bei Amateurmikroskopikern bestens bekannt für sein einzigartiges Bestimmungsbuch »Das Leben im Wassertropfen«) und seiner Kollegin Annegret Bäuerle ist mit dem »Farbatlas« ein großer Wurf gelungen.

Allen voran stehen die histologischen Dauerpräparate von Wirbellosen, denn das Buch ist systematisch aufgebaut und beginnt bei den ursprünglichsten Lebensformen. Die Bilder der zumeist mehrfarbig gefärbten Präparate sind eine Augenweide. Sie sind fast allesamt gestochen scharf, nahezu sämtliche Präparate sind völlig einwandfrei, und vor allem sind die Fotos mit einer ungeheuren Gründlichkeit beschriftet.

Alle bedeutenden Stämme des Tierreichs werden nacheinander abgehandelt, meistens in Detaildarstellungen von histologischen Schnitten oder, etwa bei kleineren Tieren, in Form von Totalpräparaten. Bei jedem Foto sind zahlreiche Einzelstrukturen (118 Stück bei dem Längsschnitt durch eine Jungmaus) durch Zuweisungsstriche gekennzeichnet; hinzu kommt eine ausführliche Legende zur abgebildeten Gesamtstruktur und zu den Einzelheiten der Präparation.

Weitere Angaben zu dem jeweils abgebildeten Tier sucht man vergebens. Die Autoren geben noch nicht einmal eine Einordnung in einen Stammbaum und unterlassen jeden Hinweis auf homologe oder analoge Strukturen, obgleich die einzigartigen Bilder dazu reichhaltiges Anschauungsmaterial liefern. Die Selbstbeschränkung hat Methode: Die Autoren verstehen ihr Werk ausdrücklich als praxisorientierten Leitfaden zur Bearbeitung zoologischer Dauerpräparate sowie als nützliches Handbuch und Nachschlagewerk in Ergänzung zu den gängigen Lehrbüchern – nicht weniger, aber auch nicht mehr.

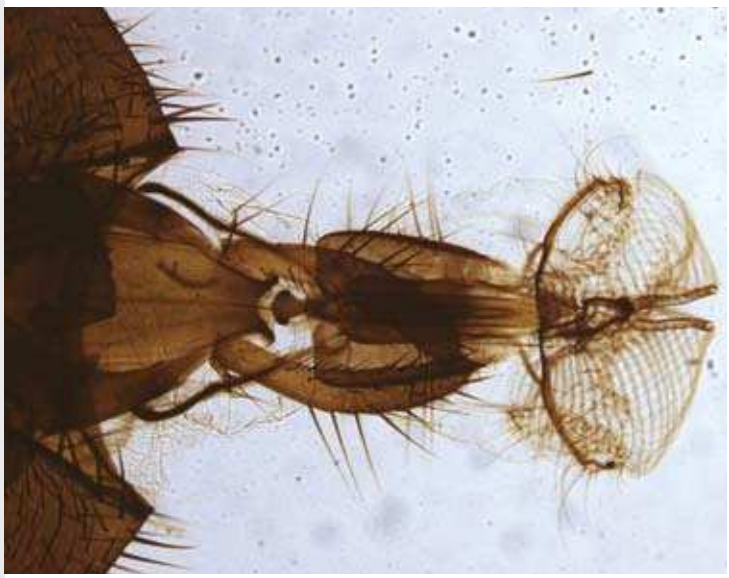
Das ist schade; denn dieser Atlas hätte das Zeug zu einem selbst-verständlichen Werk gehabt, dessen Nutzer ohne ein Lehrbuch und ohne Vorkenntnisse zu den besprochenen Tiergruppen auskommt. Einer kommenden Auflage ist zu wünschen, dass der Verlag ein mit dem Atlas korrespondierendes Lehrbuch empfiehlt und Lehrbuch wie Atlas aufeinander abstimmt.

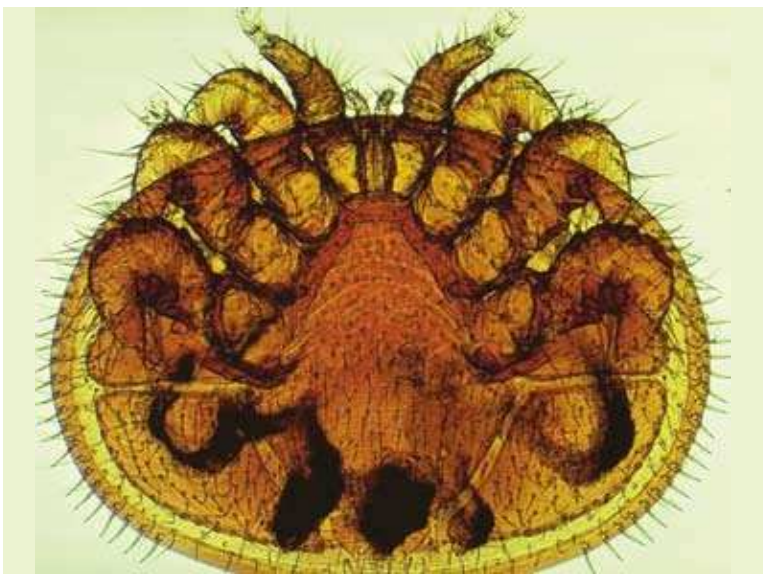
Hoffentlich erscheinen bald Ausgaben in anderen Sprachen, insbesondere auf Englisch, damit überall auf der Welt der systematik- und strukturinteressierte Profi- oder Amateurzoologe aufseufzen kann: Endlich!

Ralf Anken

Der Rezensent ist Dozent am Institut für Zoologie der Universität Hohenheim.

Heinz Streble und Annegret Bäuerle
Histologie der Tiere
Ein Farbatlas
Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, München 2007. 192 Seiten, € 24,95

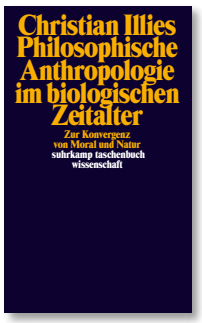




Zwei Totalpräparate: links Rüssel der Stubenfliege *Musca domestica*; rechts eine weibliche Bienenmilbe *Varroa jacobsoni*

Angeborene Moral und Vernunft sind keine Gegensätze

Im Gegenteil: Unter denkfähigen Kulturen hat diejenige einen Selektionsvorteil, die ihre moralischen Grundsätze mit der Vernunft begründen kann.



Wenn es nach Richard Dawkins, Daniel Dennett, Edward O. Wilson und ihren Mitstreitern geht, dann obliegt die Beantwortung der Frage, was es bedeutet, Mensch zu sein, und wie wir handeln sollen, allein der Evolutionsbiologie. Alles, was Philosophie und andere Geisteswissenschaften dazu beitragen können, sei nur metaphysischer Humbug. Die Evolutionsbiologie könne zwar noch keine voll ausformulierte Alternative zur klassischen Moralphilosophie anbieten, aber dies sei nur eine Frage der Zeit. Da ist es wenig verwunderlich, dass mancher klassische Moralphilosoph auf diesen groben Klotz einen groben Keil setzt.

Der Philosoph und Biologe Christian Illies, der seit Sommer 2006 Philosophie der Kultur und Technik an der Technischen Universität Delft (Niederlande) lehrt, steuert in diesem Getümmel einen Mittelweg. Er selbst beschreibt sein neues Buch als »vorausschauend«, als Reflexionshilfe für eine künftige Welt, in der die empirischen Lebenswissenschaften, vor allem Neurobiologie, Soziobiologie und evolutionäre Psychologie, mehr Material zur Deutung des Menschen vorzuweisen haben werden als heute.

Seine Argumentation mündet in eine überzeugende Antwort auf den monopolistischen Deutungsanspruch der Lebenswissenschaften; allerdings übersieht diese Antwort plausible Auflösungen der Kontroverse um die evolutionäre Herkunft unserer Moralvorstellungen.

Christian Illies geht davon aus, dass die empirischen und theoretischen Erkenntnisse der Naturwissenschaften in der Tat in die Moralphilosophie einfließen müssen. Konsequenterweise macht er ausgiebigen Gebrauch von alten und neuen Ergebnissen der Soziobiologie, der Spieltheorie und der experimentellen Ökonomie. Das Buch kulminiert in der These, dass der Mensch von Natur aus moralfähig und für ein Verhalten gemäß denjenigen Normen und Werten angelegt ist, die auch von der Vernunft als richtig eingesehen werden können: Natürliche Anlagen und Vernunftmoral sind laut Illies konvergent.

Damit weist er aber zugleich auch den Biologismus in die Schranken: Die Vernunft hat, neben der Naturwissenschaft und auf sie nicht reduzierbar, eine Begründungsmacht zur Legitimierung moralischer Systeme. Im Selektionskontext einer nach Geltungsgründen fragenden Kultur ist die vernunftgeleitete Begründbarkeit einer Moral ein entscheidender Vorteil. Moral und menschliche Vernunft sind beides Anpassungen, also Produkte der natürlichen Auslese, und in einer aufgeklärten Kultur müssen die beiden konvergieren.

Dawkins in der Urform ist überholt

Dies ist eine elegante und überzeugende Alternative zum Projekt der Soziobiologen. Aber Illies setzt sich mit einem Gegner auseinander, dessen Einfluss schon lange seinen Zenit überschritten hat und der nur noch in populären Sachbüchern und Feuilletondebatten punkten kann. In der Evolutionsbiologie ist die wissenschaftsinterne Debatte nach wie vor kontrovers und noch lange nicht abgeschlossen, aber inzwischen weit über Dawkins in seiner Urform hinaus. Radikale, aber legitime Deutungen der Erkenntnisse der evolutionären Entwicklungsbiologie machen der natürlichen Auslese das Erklärungsmonopol streitig, und die Verbindung von Evolutionsbiologie und Entwicklungspsychologie offenbart die oft atemberaubende Naivität soziobiologischer Erklärungen menschlichen Verhaltens.

Diese Entwicklung hat Illies offensichtlich nicht mitvollzogen. Er schreibt in seinem Buch andauernd von »biologischen Anlagen«, als käme ein Mensch mit einer festen und fertigen Ausstattung von Fähigkeiten und Dispositionen zur Welt, die sich nur schrittweise in einem angemessenen sozialen Kontext entfalten müssen. Diese Annahme hat durch ihre ständige und unkritische Wiederholung eine Faktizität erlangt, die einer soliden empirischen Grundlage entbehrt. Ein paradigmatisches Beispiel für eine solche angeblich angeborene Disposition ist für Soziobiologen und Evolutionspsychologen die menschliche Sprachfähigkeit.

Dagegen hat Michael Tomasello in seinen Büchern »Die kulturelle Entwicklung des menschlichen Denkens« (2004) und »Constructing a Language« (2005) gezeigt, dass komplexe menschliche Verhaltensweisen, Fähigkeiten und Eigenschaften in der Individualentwicklung in einem sozial eingebetteten Gebrauch konstruiert werden und keiner detaillierten genetischen Kodierung bedürfen – Konstruktion (Epigenese) und nicht Entfaltung vorgefertigter Anlagen (Präformation) ist die Art und Weise, wie der Mensch seine Form und seine Fähigkeiten erlangt. Laut Tomasello ist eine menschliche Schlüsselanpassung die sich im Lauf der Individualentwicklung manifestierende Fähigkeit, sich in die kognitive Welt anderer Menschen zu versetzen, Empathie zu zeigen; diese Fähigkeit ist in der komplexen sozialen Welt unserer Primatenvorfahren ausgelesen worden.

Die Moralität des Menschen gründet sich, wie Jean Piaget schon vor mehr als 70 Jahren vermutete, möglicherweise auf diese Fähigkeit. Kinder konstruieren sich ihr moralisches Universum im Umgang mit Gleichaltrigen und unter der Anleitung von Erwachsenen. Moralität ist Teil unserer – kulturell und sozial geformten – Natur und muss dieser nicht abgerungen werden. Illies stimmt mit dieser Diagnose überein, aber er neigt dazu, im Einklang mit der Soziobiologie die auf den Menschen wirkenden genetischen und biologischen Zwänge zu überschätzen.

Christian Illies' Buch hinterlässt letztendlich einen zwiespältigen Eindruck. Es gelingt ihm überzeugend, die Deutungsansprüche der Lebenswissenschaften in Schranken zu weisen. Zugleich aber akzeptiert er zu kritiklos die Grundlagen dieser Deutungsansprüche. Von einem in der Biologie versierten Philosophen kann auch erwartet werden, dass die angeblich objektiven Erkenntnisse der Lebenswissenschaften auf versteckte metaphysische Annahmen untersucht werden.

Thomas P. Weber

Der Rezensent ist Zoologe und Buchautor. Er arbeitet an der Modellierung von Infektionskrankheiten an der Gemeinsamen Forschungsstelle der EU in Ispra (Italien).

Christian Illies
Philosophische Anthropologie im biologischen Zeitalter
Zur Konvergenz von Moral und Natur
Suhrkamp, Frankfurt am Main 2006.
361 Seiten, € 13,–

PHYSIK

Im Bann der Quantenwelt

Eine Schülerin gibt eine alternative Einführung ins rätselhafte Reich der Kleinstteilchen.

»Man kann mit Sicherheit sagen, dass niemand die Quantenmechanik versteht«, sagte einst der Teilchenphysiker Richard Feynman und sorgte damit bei seinen Studenten für große Erleichterung. Denn der Anfänger, der in die faszinierende Welt der Quanten gerät, stolpert schnell über den gesunden Menschenverstand.

Das ging der Berliner Abiturientin Silvia Arroyo Camejo nicht besser. Aber an Stelle der üblichen Schreckstarre entschloss sie sich kurzerhand, den Missstand selbst aus dem Weg zu räumen und »die Lücke zwischen der meist formelfreien populärwissenschaftlichen Literatur und der mit höherer Mathematik gespickten Studienliteratur« mit einem eigenen Buch zu schließen. Das Vorhaben löste vergangenes Jahr eine Lawine der Begeisterung in Tages- und Wochenzeitungen aus. Da war ich etwas skeptisch: Ausgerechnet eine Schülerin will den Olymp der modernen Wissenschaftswelt besteigen? Ob das gut geht?

Mit unübersehbarer Begeisterung widmet sich die Gipfelstürmerin der ganzen Palette der Quantenphänomene – vom Photoeffekt bis hin zur futuristischen Quantengravitation. Auf anschauliche und behutsame Weise macht sie den Leser mit den zur Quantentheorie führenden Entdeckungen vertraut. Man fühlt sich manchmal tatsächlich so, als würde man wieder die Schulbank drücken und bekäme das Wissen mundgerecht serviert.

Zu Beginn erläutert die junge Berlinerin in aller Ausführlichkeit den Welle-Teilchen-Dualismus. Die bildhaften Darstellungen dieses hochtheoretischen Themas sind mal gelungen, mal für meinen Geschmack etwas befremdlich: »Fragen Sie bitte beispielsweise einen Fußballspieler, wann er seinen Fußball das letzte Mal an zwei Orten gleichzeitig gesehen hat!«

Wie in der populärwissenschaftlichen Literatur überwiegt die textliche Erläuterung; wo das sinnvoll ist, wird diese aber durch Grafiken und Formeln ergänzt. Die Mathematik bewegt sich meist auf gehobenem Schulniveau. Nur im Kapitel über die Schrödinger-Gleichung gefährden plötzlich komplexe Zahlen und Laplace-Operatoren den emsigen Lesefluss des interessierten Laien und machen ihm schmerzlich bewusst, dass die moderne Physik untrennbar mit höherer Mathematik verbunden ist.

Frei von Formeln ist dagegen die historische Aufarbeitung der Einstein-Bohr-Debatte, in deren Verlauf sich Altmeister Einstein gegen die nichtdeterministische Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik auflehnte. Der Fachmann lernt hier nichts Neues; für viele andere dürfte die Widerspenstigkeit des Vaters der Relativitätstheorie aber überraschend kommen.

In der Tat ist »Skurrile Quantenwelt« primär ein Buch für ambitionierte Physikinteressierte ohne große Vorbildung. Der Brückenschlag zwischen Laien- und Lehrbuch ist der Autorin überwiegend gut gelungen. Der allgegenwärtige Schülercharme ist dagegen Geschmackssache. Ich fühlte mich von der stellenweise naiven Herangehensweise und den ausufernden Erklärungen der ersten 100 Seiten etwas genervt und wollte das Buch fast schon aus der Hand legen. Das wäre schade gewesen, denn zu den wirklich interessanten Themen kommt die Autorin erst im letzten Viertel.

Leider sind in der Quanternmechanik die interessanten Dinge meistens auch kompliziert. Bei der Diskussion des Einstein-Podolsky-Rosen-(EPR-)Paradoxons, der Bell'schen Ungleichung und der Quantengravitation gerät die Autorin in philosophisches Fahrwasser; denn wie die Erkenntnisse der Quantenmechanik ausgelegt werden sollen, ist noch heute Gegenstand heißer Diskussionen. Trotzdem oder gerade deswegen verbirgt sich in diesem Schlussteil die echte Stärke des Buchs, was die zu ausführlich geratene erste Hälfte vergessen macht: Mit jugendlichen Augen gibt die Autorin einen Überblick über die gängigsten Theorien und Deutungen rund um die Quantenphysik, was auch für gestandene Physiker eine interessante Auseinandersetzung mit diesem kontroversen Thema bietet.

Derweil bleiben dank der unterschiedlichen Interpretationsmöglichkeiten und der offenen Zukunft der Quantengravitationstheorien auch nach der Lektüre von »Skurrile Quantenwelt« viele Geheimnisse ungelüftet. Da kommen einem unverhofft die Worte von Feynmans Kollegen Enrico Fermi in den Sinn: »Ich bin immer noch verwirrt, aber auf einem höheren Niveau.« Für Silvia Arroyo Camejo war dieses Niveau offenbar nicht hoch genug: Sie studiert mittlerweile Physik und kämpft sich so noch tiefer hinein ins Dickicht der Quantenwelt.

Robert Gast

Der Rezensent studiert Physik in Heidelberg und arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist.

Silvia Arroyo Camejo
Skurrile Quantenwelt
Springer, Berlin 2006.
246 Seiten, € 19,95;
Taschenbuchausgabe (Oktober 2007) € 12,95

RELIGIONSKRITIK

Mit Eloquenz gegen die Fundamentalisten

Aber diesmal hat Richard Dawkins nichts wirklich Neues zu bieten – und lässt sich auch noch gute Argumente entgehen.

Genau dreißig Jahre nach seinem Bestseller »Das egoistische Gen« hat der britische Evolutionsbiologe Richard Dawkins ein Buch geschrieben, das noch viel schneller zum Bestsellerstatus aufgestiegen ist: Während »Das egoistische Gen« über die Jahre in 25 Sprachen übersetzt worden ist, kommt »Der Gotteswahn« nach nur einem einzigen Jahr auf 30 fremdsprachige Ausgaben.

Ist das neue Werk ähnlich revolutionär wie das alte? Leider nein! Es ist, wie jedes Buch von Richard Dawkins, ebenso elegant wie amüsant geschrieben und enthält eine Fülle von hilfreichen Informationen zum Thema Religionskritik. Doch anders als »Das egoistische Gen« stellt »Der Gotteswahn« unser Weltbild nicht auf den Kopf. Skeptiker, Agnostiker oder Atheisten werden den Eindruck gewinnen, dass Dawkins

offene Türen einrennt. Juden, Christen oder Muslime werden bestreiten, dass der Gott, den Dawkins kritisiert, ihr Gott sei. Die meisten Rezensionen im angloamerikanischen Raum beschränken sich darauf, Dawkins vorzuwerfen, er habe die Bibel nicht richtig verstanden, argumentiere unangemessen polemisch und sei letztlich genauso fundamentalistisch wie diejenigen, gegen die er so rigoros zu Felde zieht.

Aber der Reihe nach. Eines der zehn Kapitel setzt sich mit den traditionellen Gottesbeweisen auseinander. Wie zahllose Autoren vor ihm zeigt Dawkins, dass keines der Argumente für die Existenz Gottes wirklich schlüssig ist. Sie beweisen bestenfalls eine »erste Ursache« oder einen »unbewegten Beweger«, doch keinesfalls den allmächtigen, allwissenden und allgütigen Gott der abrahamitischen Religionen.

Ein weiteres Kapitel geht den evolutionären Wurzeln der Religion nach. Wie konnte die Natur, die sonst so haushälterisch mit ihren Kräften umgeht, ein so extravagantes Verhalten wie die Religiosität hervorbringen, das die Menschen mit sinnlosen Opfern, Gebeten und Ritualen aufhält und weder dem eigenen Überleben noch der eigenen Fortpflanzung dient? Dawkins erklärt sie, analog den Brustwarzen des Manns, zum unvermeidlichen Nebenprodukt einer anderwärts vorteilhaften Eigenschaft, in diesem Falle der vererblichen Neigung der Kinder, alles unhinterfragt zu glauben, was die Autoritätspersonen ihnen erzählen. Weitere Erklärungen folgen demselben Muster.

Als guter Naturalist zeigt Dawkins im nächsten Kapitel, dass wir keineswegs auf eine übernatürliche Wesenheit wie einen Gott angewiesen sind, um zu erklären, warum sich Menschen moralisch verhalten. Moralisches Verhalten hat evolutionäre Wurzeln. Gebote wie »Du sollst nicht stehlen«, »Du sollst nicht lügen« oder »Du sollst nicht töten« galten schon Hundertausende von Jahren, bevor Moses sie auf dem Berg Sinai aus Gottes Hand entgegennahm.

Ein weiteres Argument für die Religion zerpflückt Dawkins im Schlusskapitel: Wir brauchen sie nicht, um unserem Leben einen Sinn zu geben. Teil der Evolutionsgeschichte zu sein ist ein mindestens genauso aufregendes Abenteuer wie Teil einer Schöpfungsgeschichte zu sein. Und die Hypothesen der Wissenschaft sind allemal spannender als die Mythen der Religion.

Auch die übrigen Kapitel sind über die Maßen lesenswert. Dennoch hätte Dawkins' Buch noch überzeugender ausfallen können,

rowohlt

Hören Sie auf Ihren Bauch!

Gerald Traufetter über unser gefühltes Wissen und wie wir es uns bewusst zunutze machen können.

336 Seiten. € 19,90 (D)

wenn er nicht in drei Punkten ohne Not weit reichende Konzessionen gemacht hätte.

▶ Menschen hätten ein angeborenes Bedürfnis nach Religion. Der Versuch, die Mehrzahl der Bevölkerung von ihren himmlischen Hoffnungen abzubringen, sei zum Scheitern verurteilt. Das ist falsch, wie das Beispiel der ehemaligen DDR zeigt. Trotz der Wiedereinführung des Religionsunterrichts und immenser Bemühungen gelingt es den Kirchen nicht, die Brüder und Schwestern im Osten zu bekehren.

▶ Ohne eine religiöse Grundlage falle die Moral einem hoffnungslosen Relativismus zum Opfer. Das ist schon fast das Zugeständnis, dass die Religion das Fundament der Ethik sei, und falsch obendrein, wie Sokrates vor mehr als zweitausend Jahren schon gezeigt hat: Man stelle einem religiösen Menschen, der glaubt, dass gut sei, was Gott gutheiße, und schlecht sei, was Gott schlechtheiße, nur folgende Frage: »Ist die Nächstenliebe gut, weil Gott sie zufällig gutheißt, oder heißt Gott die Nächstenliebe gut, weil sie tatsächlich gut ist?« Da kein Christ seinen Gott für einen willkürlichen Herrscher hält, wird er selbstverständlich antworten, dass Gott die Nächstenliebe gutheiße, weil sie in der Tat gut ist. Damit aber gibt er zu, dass es ein von Gott unabhängiges Kriterium dafür gibt, was moralisch richtig und falsch ist.

▶ Am erstaunlichsten ist jedoch, dass Dawkins die Frage der Theodizee nicht aufgreift. Das Leid und Elend dieser Welt ist mit der behaupteten Allmacht, Allwissenheit und Allgüte Gottes nicht in Einklang zu bringen, was nach wie vor den größten Einwand gegen den Glauben an einen gütigen Schöpfer bildet. In diesem Punkt hätte Dawkins nur seinem großen Vorbild Charles Darwin zu folgen brauchen.

Wer Dawkins' Stil und seine eloquente Argumentation schätzt, sollte sich den »Gotteswahn« nicht entgehen lassen. Wer auf deutsche Gründlichkeit und philosophische Tiefe setzt, sollte sich besser Norbert Hoersters »Die Frage nach Gott« zulegen.

Edgar Dahl

Der Rezensent ist promovierter Philosoph, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Frauenheilkunde und Geburtshilfe der Universiät Gießen und Pressesprecher der Deutschen Gesellschaft für Reproduktionsmedizin.

Richard Dawkins
Der Gotteswahn
Aus dem Englischen von Sebastian Vogel.
Ullstein, Berlin 2007. 560 Seiten, € 22,90

MATHEMATIK

Merkwürdiges und Scherzhaftes

Heinrich Hemme bietet abermals eine bunte Mischung aus dem reichen Schatz seiner Rätsel.

» Ein Esel hat vorne zwei Beine, hinten zwei Beine, rechts zwei Beine, links zwei Beine und an jeder Ecke ein Bein, also insgesamt zwölf Beine.« In diesem Scherz ist der Fehler leicht zu erkennen; aber für viele der Knobelaufgaben dieses Buchs fängt die Lösung tatsächlich so an. Nur darf man hinterher nicht vergessen, die doppelt oder mehrfach gezählten Eselsbeine – oder was auch immer – wieder abzuziehen.

Das Buch ist ein Querschnitt durch die Unterhaltungsmathematik auf gehobenem Niveau. Wenn Sie ein geduldiger Mensch mit Vorliebe für Knobeleien sind, werden Sie viele Stunden damit verbringen können. Immerhin kommen auf 38 Seiten Aufgaben 80 Seiten Lösungen. Für Menschen mit niedriger Frustrationstoleranz ist das Buch eher ungeeignet.

Die mehr oder weniger unterhaltsamen Denksportaufgaben stammen aus allen Bereichen der Mathematik. Viele haben mich gereizt, andere erinnerten mich eher an Hausaufgaben. Insgesamt waren unter den Aufgaben nicht sehr viele, die ich problemlos lösen konnte oder wollte, ohne im Lösungsteil nachzusehen.

Manche gleichen eher Übungsaufgaben für Mathematikstudenten: »Finde eine direkte Berechnungsformel für *n*-dimensionale Pyramidenzahlen.« Für gewisse Knobelaufgaben und die bekannten Probleme, in denen man ein paar Streichhölzer umlegen muss, muss man »um die Ecke denken«, kommt aber mit etwas Übung, einer gehörigen Portion Probieren (auch mit einem Taschenrechner) und Glück größtenteils dahinter. Einige geometrische Probleme sind sehr interessant.

»Gegeben sind zehn Aussagen, die sich aufeinander beziehen und jede für sich wahr oder falsch sein können. Welche stimmen?« Knobelaufgaben dieser Form sind sehr anspruchsvoll und in meinen Augen kaum lösbar. Wenn Sie triviale Aufgaben in diesem Buch finden, sind es reine Scherzfragen.

Manche Lösungen sind an den Haaren herbeigezogen. Aufgabe 6 hat mich regelrecht geärgert. Da soll ein magisches Quadrat der Größe 3×3 mit einigen Zusatzbedingungen gefunden werden, wobei »die Ziffern in allen neun Feldern verschieden sein« müssen. Wer kommt da auf die Idee, dass die Einträge des Quadrats zwar nicht alle voneinander verschieden sein müssen, aber verschieden ausgedrückt sein sollen? Und zwar darf in jedem Kästchen nur eine Ziffer vorkommen, die aber beliebig oft und mit allerlei Rechenzeichen dazwischen.

Angeblich reicht für die Lösung aller Probleme die Schulmathematik aus. Da bin ich nicht so sicher. Nicht dass man gewisse Formeln und Gesetze benötigen würde, die in der Schule nicht gelehrt werden; aber man braucht die etwas andere Art zu denken.

Viele Bücher liest man einmal, und dann verstauben sie im Regal. Dieses Buch gehört nicht zu dieser Sorte, sondern verdient einen Platz in der vordersten Reihe.

Heike Diehsner

Die Rezensentin ist Diplommathematikerin und arbeitet bei der Dresdner Bank in Karlsruhe.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Heinrich Hemme
Der 12-beinige Esel
93 mathematische Rätsel mit ausführlichen Lösungen
Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 2006.
128 Seiten, € 14,90

In gleicher Aufmachung ist inzwischen erschienen:

Heinrich Hemme
Die Hölle der Zahlen
92 mathematische Rätsel mit ausführlichen Lösungen
Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 2007.
136 Seiten, € 14,90

VORSCHAU

Heft Dezember 2007
ab 27. November im Handel

FOTOILLUSTRATION: JEN CHRISTIANSEN; FOTO: CORBIS-ZEFA

Fenster zum Gehirn

Winzige, unwillkürliche Zuckungen des Auges, die für das Sehen unerlässlich sind, verraten zugleich unbewusste Absichten

WEITERE THEMEN IM DEZEMBER

Erblicher Alkoholismus

Das Risiko für Alkoholsucht ist über die Hälfte genetisch bestimmt. Dies kann Vorbelasteten helfen, sich besser vor der Sucht zu schützen

Die Vorfahren der Wikinger

Aus Bauern wurden Krieger, aus Clanchefs Könige, aus Germanen jene wilden Nordmänner, die Europas Küsten heimsuchten

GETTY IMAGES

Landwirtschaft der Zukunft

Der Wechsel zu mehrjährigen Feldfrüchten könnte ein Grundproblem der heutigen Agrarwirtschaft lösen: die Vernichtung von Ökosystemen und Artenvielfalt. Solche Pflanzen wurzeln tief und gedeihen auch in bisher unfruchtbaren Böden – für eine weiter wachsende Weltbevölkerung

ILLUSTRATION: KENN BROWN

Spintronik mit Diamanten

Edelsteine machen es möglich: ultraschnelle Quantencomputer auf Basis von Elektronenspins, die bei Zimmertemperatur arbeiten

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

www.spektrum.com/newsletter